

**Vysoká škola báňská - Technická univerzita
Ostrava**

Fakulta bezpečnostního inženýrství

Katedra požární ochrany

**Stanovení vlivu příměsi malého množství
hořlavého plynu na výbuchové parametry
uhelných prachů**

Student:

Vedoucí diplomové práce:

Studijní obor:

Datum zadání diplomové práce:

Termín odevzdání diplomové práce:

Ing. Ivo Konderla

doc. Ing. Jaroslav Damec

**Technika požární ochrany
a bezpečnost průmyslu**

30. 11. 2009

30. 4. 2010

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta bezpečnostního inženýrství
Katedra požární ochrany a ochrany obyvatelstva

Zadání diplomové práce

Student: **Ing. Ivo Konderla**

Studijní program: N3908 Požární ochrana a průmyslová bezpečnost

Studijní obor: 3908T006 Technika požární ochrany a bezpečnost průmyslu

Téma: Stanovení vlivu příměsi malého množství hořlavého plynu na výbuchové parametry uhelných prachů
Determination of the Influence of Addition of a Small Amount of Combustible Gas on Explosion Parameters of Coal Dusts

Zásady pro vypracování:

Cíl práce:

Stanovení vlivu příměsi malého množství hořlavého plynu na výbuchové parametry uhelných prachů.

Charakteristika práce:

Studium výbušných vlastností hybridních směsí. Vytváření hybridních směsí ve výbuchovém autoklávu VA 250. Měření vlivu příměsi plynu na výbuchové parametry. Vyhodnocení měření a jejich porovnání se zahraničními autory.

Seznam doporučené odborné literatury:

Damec, J.-Choleva, L. Laboratorní praktikum protivýbuchové prevence technologických procesů. Učební text MV ČSSR, Praha, 1980.

Damec, J. Protivýbuchová prevence – návody na cvičení. Skripta VŠB. Ostrava. 1993. 51 s.

Damec, J. Protivýbuchová prevence. Učebnice pro studenty oboru TPO a BP. Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství – edice SPBI Spektrum č.8. Ostrava. 1999.

Staub Reinhaltung der Luft.

International Standard ISO 6184. Explosion Protection Systems.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

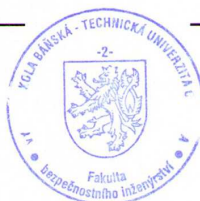
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jaroslav Damec, CSc.**

Datum zadání: 30.11.2009

Datum odevzdání: 30.04.2010



Ing. Isabela Bradáčová, CSc.
vedoucí katedry





prof. Dr. Ing. Aleš Dudáček
děkan fakulty

Anotace

KONDERLA, Ivo. *Stanovení vlivu příměsi malého množství hořlavého plynu na výbuchové parametry uhelných prachů*. Ostrava, 2010. Diplomová práce (Ing.). Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství.

Klíčová slova: výbuchové parametry, hybridní směs, uhlý prach, metan, výbuchový tlak, rychlost nárůstu výbuchového tlaku

Tato diplomová práce se zabývá problematikou ovlivnění výbuchových parametrů uhelných prachů přidáním malého množství hořlavého plynu, metanu. Práce nejprve nastiňuje problematiku výbuchových parametrů, způsoby jejich ovlivnění a tvorbu hybridních směsí. V další části prezentuje laboratorní měření vlivu přídavku různého množství metanu na maximální výbuchový tlak a maximální rychlost nárůstu výbuchového tlaku uhlého prachu a výsledky porovnává s jinými autory.

Anotation

KONDERLA, Ivo. *Determination of the Influence of Addition of a Small Amount of Combustible Gas on Explosion Parameters of Coal Dusts*. Ostrava, 2010. Thesis (Ing.). VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Safety Engineering.

Key words: explosion parameters, hybrid mixture, coal dust, methane, explosion pressure, rate of explosion pressure rise

This thesis focus on the matters of explosion parameters of coal dusts and the effect of addition of combustible gas, methane. At first, the thesis aims to clarify the ways to influence explosion parameters and the issue of hybrid mixtures. In the second part, the thesis presents laboratory tests of influence of addition of various amount of methane to the mixture of coal dust with air and its effect on maximal pressure and maximal rate of pressure rise. In the end, the results are presented and compared to other author's works.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně.

V Ostravě 28. dubna 2010

Ing. Ivo Konderla

.....

Poděkování

Chtěl bych poděkovat pracovníkům VVUÚ, a.s. v Ostravě - Radvanicích za spolupráci při laboratorních měření, poskytnuté materiály a odbornou pomoc.

Obsah

1.	Úvod.....	1
2.	Úvod do problematiky	3
2.1.	Použité pojmy a jejich vysvětlení	3
2.2.	Výbuch.....	7
2.2.1.	Výbuchová křivka.....	9
2.2.2.	Rozsah výbušnosti	10
2.2.3.	Meze výbušnosti	11
2.2.4.	Ovlivnění maximálních výbuchových parametrů a průběhu výbuchu ...	13
3.	Hybridní směsi	26
4.	Měřicí zařízení a postupy.....	30
4.1.	Výbuchový autokláv VA – 20	30
4.2.	Postup měření.....	33
5.	Měřené vzorky	36
5.1.	Uhelný prach.....	36
5.2.	Metan	41
6.	Vliv příměsí hořlavého plynu na výbuchové parametry uhelných prachů	42
6.1.	Výsledky měření	42
6.2.	Porovnání výsledků měření s jinými autory	48
7.	Závěr	50
8.	Literatura.....	51
9.	Přílohy.....	55

1. Úvod

Výbuch je v požární praxi nežádoucí jev, při kterém dochází ve velmi krátkém čase k uvolnění velkého množství energie ve formě tepla. Působení tepla na hmotu plynů má za následek rychlé zvětšení objemu a v důsledku toho rychlý nárůst tlaku. Prudkým nárůstem tlaku dochází k značným destrukcím, finančním ztrátám na stavebních konstrukcích, technologiích a často bohužel i ke ztrátám na životech. Z těchto důvodů je protivýbuchová ochrana a prevence důležitou a nepostradatelnou součástí mnoha lidských činností, při kterých může k výbuchům docházet.

Aby mohlo k výbuchu dojít, musí být k dispozici prostor, dostatečně silný iniciační zdroj a především výbušná atmosféra tvořená směsí hořlavé látky a oxidačního prostředku v potřebné koncentraci. Výbušné směsi mohou tvořit jak hořlavé plyny, páry hořlavých kapalin, tak i pevné látky ve formě prachů a jejich kombinace. Tyto kombinace výbušných směsí hořlavých látek různých skupenství se nazývají hybridní směsi. Právě studiem výbušných vlastností hybridních směsí se budeme v naší práci podrobněji zabývat.

První část této práce objasňuje základní principy problematiky protivýbuchové ochrany, vysvětluje elementární pojmy z oblasti protivýbuchové ochrany a základní poznatky o výbuchu. Dále pak rozebírá pojmy výbuchové parametry, zejména pak maximální výbuchový tlak a maximální rychlost nárůstu výbuchového tlaku, podrobněji rozebírá možnosti ovlivnění těchto parametrů. Tyto poznatky jsou důležité zejména pro pochopení výsledků laboratorních měření v širším kontextu, co se například zvoleného objemu testovacího zařízení nebo velikosti iniciační energie týče. Dále se práce zabývá tvorbou hybridních směsí a jejich vlastnostmi. V praktické části práce jsou uvedeny výsledky laboratorních měření ovlivnění výbuchových parametrů uhelných prachů vytvořením hybridní směsi přidáním malého množství hořlavého plynu.

V zadání této práce stojí, že bychom měli zkusit hybridní směsi na výbuchovém autoklávu VA – 250 o objemu 250 litrů. Toto ovšem nakonec nebylo z technických důvodů možné a proto jsme veškerá měření prováděli na menším výbuchovém autoklávu VA – 20 o objemu 20 litrů. Ve skutečnosti je zkoušení na menším z těchto dvou autoklávů více v souladu se současným hlavním proudem v evropském zkušebnictví, čili tato změna se dá označit za pozitivní. Většina evropských norem v současné době preferuje zkušební nádoby o objemu 20 litrů,

některé prameny dokonce doporučují měřit na výbuchových autoklávech o objemu 1 litr. Důvod tohoto směřování k menším objemům zkušebních zařízení je zcela zjevný a to především ve snaze ušetřit náklady. Při zkoušení na menších autoklávech značně klesá velikost navážky, výbuchové komory nemusejí odolávat tak vysokým tlakům, proto se ušetří na materiálu při jejich konstrukci. Také při vlastním zkoušení spotřebujeme mnohem méně zkoušeného materiálu, což představuje další významné úspory. Navíc hodnoty maximálního výbuchového tlaku jsou v podstatě nezávislé na velikosti objemu nádoby a hodnoty rychlosti nárůstu výbuchového tlaku se dají snadno přepočítat na kubickou konstantu, která stejně dobře charakterizuje látku a je také nezávislá na objemu nádoby, ve které byla naměřena.

Tato možnost přepočtu naměřených hodnot na parametry nezávislé na objemu nádoby, ve kterém byly naměřeny, nám umožňuje porovnávat naměřené výsledky s různými autory z různých zemí, kde často používají jiných zkušebních zařízení, než je v České republice, potažmo v Evropě běžné.

2. Úvod do problematiky

2.1. *Použité pojmy a jejich vysvětlení*

Hořlavá látka: látka ve formě plynu, páry, kapaliny, pevné látky nebo jejich směsi, která, pokud dojde k iniciaci, může vyvolat exotermickou reakci s oxidačním prostředkem (nejčastěji vzduchem). (podle [1])

Požár: spalovací proces, který je zapříčiněn zlým úmyslem, nedbalostí nebo jinými nepředvídatelnými okolnostmi. Tento spalovací proces je volně probíhající oxidačně – redukční reakcí, při níž hořlavá látka (redukční prostředek) reaguje vysokou rychlostí s oxidačním prostředkem a přitom uvolňuje značné množství energie ve formě tepla a světla. (podle [2])

Hořlavá látka: Je látka v tuhém, kapalném nebo plynném skupenství (fázi), která je za definovaných podmínek schopna hořet nebo při své látkové nebo fázové změně vytváří produkty schopné hořet. [22]

Oxidační prostředek: je látka, která při chemické reakci odevzdává kyslík a umožňuje tak reakci [22]

Chemická reakce: je pochod, při němž se výchozí látky mění v látky nové s novými vlastnostmi (produkty). Při hoření dochází u látek ke změnám a to chemickým i fyzikálním. Fyzikální změny jsou takové, kdy se složení látky nemění, ale mění se její stav nebo například tvar. [22]

Reakce exotermická: je chemická reakce, při níž se uvolňuje tepelná energie. Nejrozsáhlejší skupinou reakcí tohoto typu jsou reakce oxidační, kdy po splnění počátečních podmínek reakce dále samovolně za uvolnění tepla. Kromě hoření sem patří například dýchání. [22]

Reakce endotermická: je chemická reakce k jejíž uskutečnění se teplo spotřebovává. Aby taková reakce probíhala, je potřeba do prostoru neustále teplo dodávat, jinak se tato reakce zastaví. [22]

Výbuch: velmi rychle probíhající náhlá oxidace nebo rozkladná reakce vyznačující se vzrůstem tlaku, teploty nebo obou těchto veličin zároveň.

Deflagrace: výbuch šířící se podzvukovou rychlostí. [10]

Detonace: výbuch šířící se nadzvukovou rychlostí a vyznačující se rázovou vlnou. [10]

Výbušná atmosféra: za výbušnou atmosféru je považována směs vzduchu a hořlavé látky při (přesně definovaných) atmosférických podmínkách, při které se po iniciaci rozšíří reakce hoření do celé nespálené směsi. [3]

požárně technická charakteristika (PTCH): vlastnost látky vyjádřená měřitelnou hodnotou. Např. se jedná o spodní (příp. horní) mez výbušnosti (prach v g/m^3), teplota vznícení rozvířeného (příp. usazeného) prachu, minimální iniciační energie (v Joulech) a další.[4]

Rozsah výbušnosti: rozsah koncentrace hořlavé látky a oxidačního prostředku (nejčastěji vzdušný kyslík), při kterém může nastat výbuch.[1]

Meze výbušnosti: meze rozsahu výbušnosti.[1]

Dolní koncentrační mez výbušnosti: LEL (lower explosion limit). Nejnižší koncentrace hořlavé látky v oxidačním prostředí, při které ještě může nastat výbuch.

Horní koncentrační mez výbušnosti: UEL (upper explosion limit). Nejvyšší koncentrace hořlavé látky, při které je ve směsi přítomen ještě dostatek oxidačního prostředku, aby byl možný výbuch.

Dolní teplotní mez výbušnosti (dolní bod výbušnosti): LEP (lower explosion point). Nejnižší teplota hořlavé kapaliny, při které se vytvoří dostatek par hořlavé kapaliny ve směsi s oxidačním prostředkem, aby byl možný výbuch. Koncentrace nasycených par ve vzduchu je u LEP rovna horní koncentrační mezi výbušnosti.

Horní teplotní mez výbušnosti (horní bod výbušnosti): UEP (upper explosion point). Teplota hořlavé kapaliny, při které je koncentrace nasycených par ve vzduchu rovna horní mezi výbušnosti.

Výbušná atmosféra (explosive atmosphere): směs vzduchu a hořlavých látek ve formě plynů, par, mlh nebo prachů při atmosférických podmínkách, ve které se po vzniku iniciace rozšíří hoření do celé nespálené směsi. [1]

Prostředí s nebezpečím výbuchu (potentially explosive atmosphere): atmosféra, která může být na základě místních provozních podmínek výbušná. [1]

Hybridní směs (hybrid mixture): směs vzduchu a hořlavých látek různých fyzikálních stavů. (Např. směs metanu, uhelného prachu a vzduchu, nebo směs benzínových par a benzínových kapiček se vzduchem) [12]

Inertizace: přidávání inertní látky tak, aby byl snížen rozsah výbušnosti nebo bylo úplně zabráněno vzniku výbušné atmosféry. Princip spočívá v odstranění oxidačního prostředku ze směsi, tj. náhrada kyslíku inertem (např. dusík nebo oxid uhličitý). Jiný

princip spočívá v chladícím nebo antikatalickém účinku, třeba přidáním vody nebo inertního prachu. [7]

Mezní koncentrace kyslíku: LOC (limiting oxygen concentration). Nejvyšší koncentrace kyslíku ve směsi hořlavé látky, vzduchu a inertního plynu, při které nemůže dojít, za určitých stanovených podmínek zkoušky, k výbuchu. [1]

Kubická nádoba: má poměr délky k průměru menší než 1 : 2.

Minimální iniciační energie: MIE (minimum ignition energy). Nejnižší nahromaděná elektrická energie kondenzátoru, která je při vybití právě schopna vyvolat iniciaci nejsnadněji zápalné atmosféry při stanovených zkušebních podmínkách.

Teplota vznícení: nejnižší teplota horkého povrchu, která je za daných podmínek zkoušky, schopna iniciace směsi plynů nebo par hořlavé kapaliny se vzduchem.[4]

Teplota vzplanutí: Nejnižší teplota, při které dojde, za daných podmínek zkoušky, při přiblížení zkušebního plamene, ke vzplanutí směsi plynů nebo par hořlavých kapalin se vzduchem.[4]

Stechiometrická koncentrace: vypočtená koncentrace v objemových procentech hořlavé látky se vzduchem, při které dojde k jejímu optimálnímu spálení.[3]

Stupeň dělitelnosti (rozptýlení): čím je látka rozmělněna na drobnější částice, tím má větší povrch, na němž mohou probíhat chemické reakce. To platí pro látky ve všech skupenstvích. Příkladem mohou být podstatné rozdíly v hořlavosti hořčíku ve formě plíšku a prášku, motorové nafty nalité do nádoby a rozprášené v motoru nebo acetylenu samotného či rozprášeného ve speciálním hořáku. [11]

Výbuchové parametry: ukazatele výbušnosti stanovené standardizovanými zkušebními postupy. [16]

Výbuchový tlak $p_{\text{výb}}$: tlak vznikající v uzavřené nádobě při výbuchu výbušné atmosféry o dané koncentraci.[16]

Rychlost narůstání výbuchového tlaku $(dp/d\tau)_{\text{výb}}$: brzance. Udává rychlost narůstání výbuchového tlaku za jednotku času. Je to směrnice tečny v inflexním bodě výbuchové křivky (závislost tlaku na čase při dané koncentraci v uzavřené nádobě).

Maximální výbuchové parametry: maximální výbuchový tlak p_{max} , maximální rychlost narůstání výbuchového tlaku $(dp/d\tau)_{\text{max}}$ a kubická konstanta K_g resp. K_s jsou měřítkem energie resp. výkonu dané výbušné směsi.[1]

Maximální výbuchový tlak p_{max} (maximum explosion pressure): maximální tlak vznikající při výbuchu v uzavřené nádobě při výbuchu výbušné atmosféry za stanovených podmínek zkoušky (při optimální koncentraci).[1]

Maximální rychlost narůstání výbuchového tlaku $(dp/d\tau)_{\max}$ (maximum rate of explosion pressure rise): maximální hodnota nárůstu tlaku za jednotku času při výbuchu všech výbušných atmosfér v rozsahu výbušnosti hořlavé látky v uzavřené nádobě za stanovených zkušebních podmínek.[1]

Odolnost proti výbuchu (explosion-resistant): vlastnost nádob a zařízení konstruovaných tak, že jsou buď odolná proti výbuchovým tlakům, nebo proti výbuchovým rázům. [26]

Odolnost proti výbuchovým tlakům (explosion-pressure-resistant): vlastnost nádob a zařízení konstruovaných tak, aby odolávaly očekávanému výbuchovému tlaku bez trvalé deformace. [26]

Odolnost proti výbuchovým rázům (explosion-pressure-shock resistant): vlastnost nádob a zařízení konstruovaných tak, aby odolávaly očekávanému výbuchovému tlaku bez roztržení, ale dovolující trvalou deformaci. [24]

2.2. Výbuch

Výbuchem rozumíme velmi rychle probíhající exotermickou reakci hořlavé látky s oxidantem. V požární praxi se jedná o nežádoucí jev, při kterém může dojít k značným finančním ztrátám na stavebních konstrukcích, technologiích a často taky bohužel i ke ztrátám na životech. Při reakci tohoto typu dochází ve velmi krátkém čase k uvolnění velkého množství tepla. Teplo působí na hmotu plynů účastnících se reakce, výchozí látky i produkty, čímž dochází velmi rychle k velkému zvětšení objemu. V důsledku rozpínání hmoty plynu stoupá rychle v prostoru tlak, což může vést k silným destrukcím.

Americká NFPA definuje výbuch jako náhlou přeměnu potenciální energie (chemické, mechanické nebo nukleární) na kinetickou energii, za prudké tvorby plynů.[9]

Aby mohlo k výbuchu dojít, musí být splněny tyto tři podmínky. Musí být k dispozici prostor, kde může k výbuchu dojít, hořlavá látka musí být ve směsi s oxidačním prostředkem ve výbušné koncentraci (rozsah výbušnosti) a musí být přítomen dostatečně silný iniciační zdroj (schéma obr. 2.1) [8]



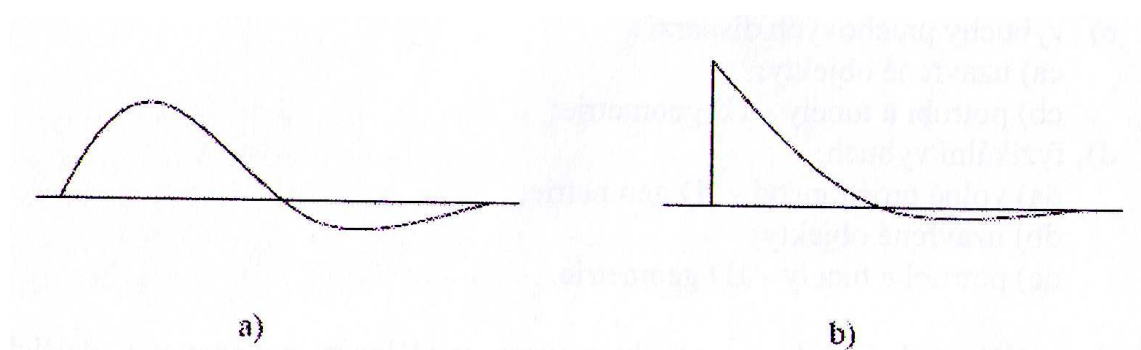
Obr. 2-1: Tři základní „stavební kameny“ pro vznik výbuchu

Z hlediska rychlosti oxidace probíhá chemický výbuch buď formou explozivního hoření (deflagrací, která se týká 90% případů hoření prachů) nebo detonací. Obě formy se od sebe liší především rychlostí šíření.

Deflagrace (explozivní hoření) se vyznačuje rychlostmi hoření od mm.s^{-1} až do desítek mm.s^{-1} a nízkými tlaky (od nepatrného přetlaku až do několika MPa). Vzhledem k rychlosti hoření dochází k tomu, že tlaková vlna předbíhá reakční pásmo.[5]

Přechod od deflagrace do detonace je děj, probíhající rychlostí až několika stovek m.s^{-1} a dosahující až stovek MPa. Jedná se proces velmi komplikovaný, na jehož vysvětlení nebyla zatím vytvořena ucelená teorie.[5]

Detonace se šíří rychlostí větší než je rychlost zvuku ($>1000 \text{ m.s}^{-1}$) a v čele tlakového pole je rázová vlna; znamená okamžitý nárůst tlaku na hodnotu jednotek až desítek GPa (detonace má diskontinuitu). V tomto případě dochází k iniciaci reakce prudkým stlačením reakční směsi nebo látky rázovou vlnou. Reakční pásmo tak bezprostředně následuje rázovou vlnu.[7]



Obr. 2-2: Průběhy tlaků ve volném prostoru, zdroj [5]

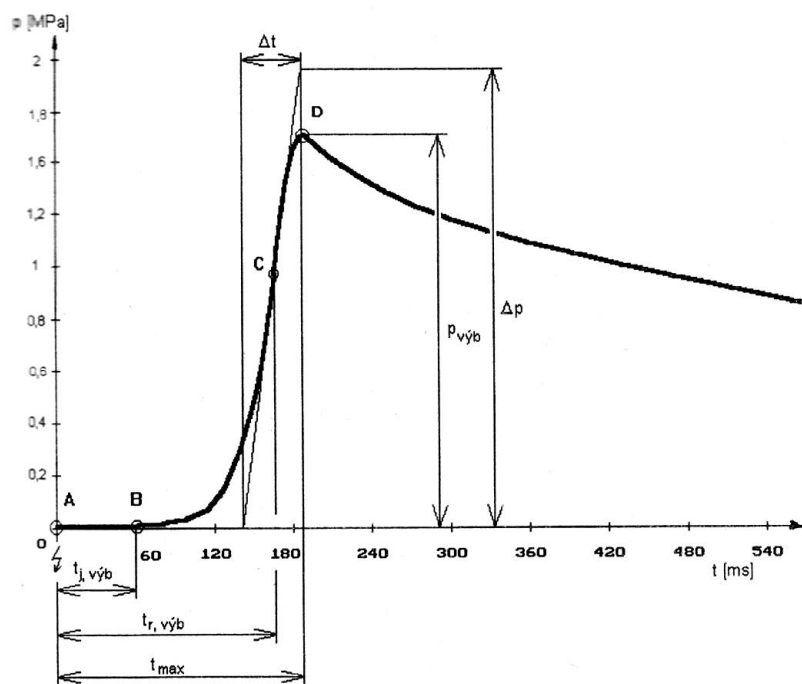
a) spojitá vlna

b) rázová vlna

Jak je vidět z obrázku 2-2, je u obou typů vln pozitivní přetlaková fáze s významným nárůstem tlaku. Přetlakovou fází následuje fáze podtlaková, která ovšem z hlediska maximálních tlaků už tak nebezpečná není. [25]

2.2.1. Výbuchová křivka

Výbuchová křivka podle [1] znázorňuje časový průběh narůstání tlaku v závislosti na čase. Po iniciaci výbušné směsi se vyvíjí větší množství tepla, než je odváděno do okolí. Toto se v uzavřeném prostoru projeví značným nárůstem tlaku. Tuto závislost znázorňuje obr. 2-3.



Obr. 2-3: Výbuchová křivka, podle [1]

Po iniciaci v bodě A uplyne doba $t_{i, \text{výb}}$ než se projeví narůstání tlaku (tzv. doba indukční periody). Je to přípravná doba výbušné směsi k hoření. Od bodu B dochází k narůstání tlaku. V důsledku zvyšování teploty se reakční rychlost zvyšuje až do bodu C, kde je rychlost narůstání výbuchového tlaku nejvyšší. Od bodu C do bodu D se rychlost narůstání výbuchového tlaku zmenšuje v důsledku ubývání reakčních složek, až v bodě D je nulová. Od bodu tlak klesá pod vlivem snižování teploty spalin a kondenzace par.

Závislost tlaku na čase při výbuchu se nazývá výbuchová křivka. Na výbuchové křivce jsou nejdůležitější body:

D je bod maxima křivky; tlak v bodě D se nazývá výbuchový tlak a značí se $p_{\text{výb}}$

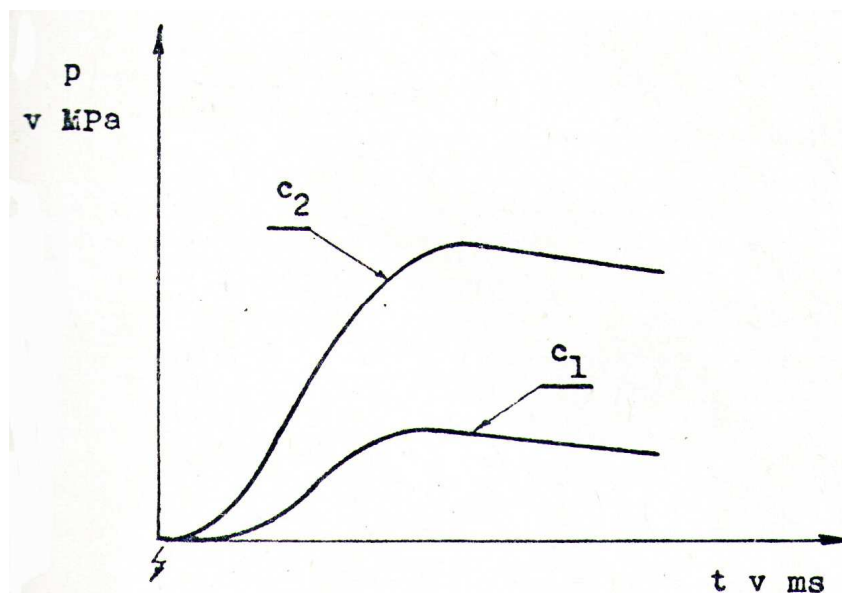
C je inflexní bod křivky, ve kterém je narůstání výbuchového tlaku nejvyšší.

Velikost tohoto nárůstu výbuchového tlaku vyjadřuje směrnice tečny v inflexním bodě C:

$$\operatorname{tg} \alpha' = \left(\frac{dp}{dt} \right)_{\text{výb}} \cong \frac{\Delta p}{\Delta t} \quad (1)$$

Výraz $\left(\frac{dp}{dt} \right)_{\text{výb}}$ vyjadřuje rychlost narůstání výbuchového tlaku při výbuchu směsi o koncentraci c_x v uzavřeném objemu velikosti V .

Podle [16][1] se tvar výbuchové křivky, a tím pádem i hodnoty $p_{\text{výb}}$ a $\left(\frac{dp}{dt} \right)_{\text{výb}}$, resp. $t_{i, \text{výb}}$, $t_{r, \text{výb}}$ a $t_{\text{max, výb}}$, výrazně mění s koncentrací výbušné směsi (obr. 2-4)



Obr. 2-4: Vliv koncentrace na tvar výbuchové křivky, [16]

2.2.2. Rozsah výbušnosti

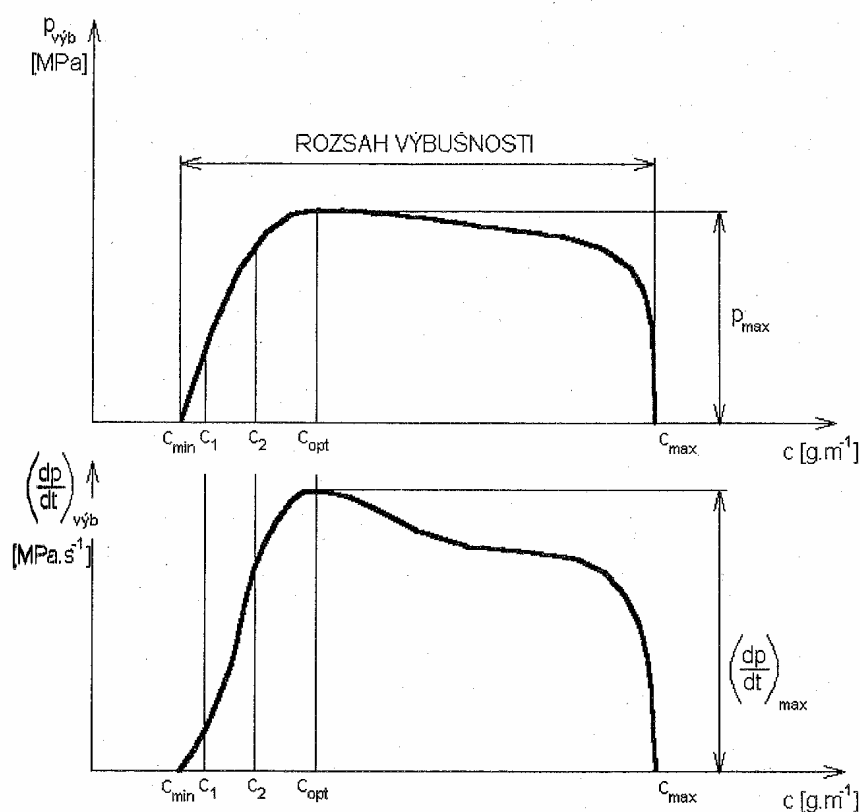
Nejvyšších hodnot $p_{\text{výb}}$ a $\left(\frac{dp}{dt} \right)_{\text{výb}}$ je dosaženo při optimální koncentraci $c_{\text{opt.}}$.

Tyto hodnoty se nazývají maximální výbuchový tlak a maximální rychlost narůstání výbuchového tlaku a značí se p_{max} a $\left(\frac{dp}{dt} \right)_{\text{max}}$. Optimální koncentrace je u plynů a par o něco málo vyšší než stechiometrická, u prachů je:

$$c_{opt} = (2a\ddot{z}3) \cdot c_{stech} \quad (2)$$

Se zvyšováním nebo snižováním koncentrace od c_{opt} se výbuchový tlak i rychlost narůstání výbuchového tlaku snižují až k mezím výbušnosti LEL (na obr. 2-5 značena jako c_{min}) a UEL (na obr. 2-5 značena jako c_{max}). Mimo rozsah výbušnosti (vymezen hranicemi c_{min} a c_{max}) není šíření výbuchu možné.

Pro naše měření jsme vycházeli z hodnot optimální koncentrace, protože při p_{max} je z požárního a bezpečnostního hlediska riziko největších škod.



Obr. 2-5: výbuchová charakteristika směsi hořlavého prachu se vzduchem, zdroj [12]

2.2.3. Meze výbušnosti

Meze výbušnosti určují rozsah výbušnosti. Mimo tyto meze není možné samostatné šíření výbuchu ve směsi.

Dolní koncentrační hranice výbušnosti (LEL) je nejnižší koncentrace hořlaviny vyjádřená v obj. % nebo v $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ve směsi se vzduchem, kyslíkem či jiným oxidačním prostředkem, která je iniciovatelná při určité energii. Homogenní směsi s koncentrací pod spodní mezí výbušnosti nejsou ani hořlavé ani výbušné.

Horní koncentrační hranice výbušnosti (UEL) je nejvyšší koncentrace hořlaviny ve směsi s oxidačním prostředkem, která je ještě výbušná. Koncentrace směsi nad horní mezí výbušnosti označujeme jako přesycené směsi, které je možno iniciovat jen při dalším přívodu vzduchu, čímž se směs zředí.

Obě hodnoty jsou značně závislé na mnoha faktorech, jedním z nich je i metodika, pomocí které byly stanoveny. Proto jsou často v různých literaturách pro jednu a tutéž látku uváděny hodnoty mnohdy dosti rozdílné. Z hlediska zajištění bezpečnosti se požaduje experimentální stanovení nebo aplikace nejnižší stanovené hodnoty. LEL je hodnota snadněji stanovitelná a taky mnohem méně závislá na fyzikálních a jiných podmínkách jako je tlak, teplota, způsob iniciace atp. Představuje asi poloviční hodnotu koncentrace stechiometrické směsi (směs, kde je přesně tolik kyslíku pro dokonalé spálení). UEL je hodnota obtížněji stanovitelná a je taky mnohem více závislá na fyzikálních podmínkách a jiných okolnostech.

Hoření v oblasti dolní a horní hranice je úplně rozdílné. Zatímco při dolní hranici probíhá hoření za přítomnosti přebytku kyslíku, v oblasti horní meze probíhá za nedostatku kyslíku. Proto je hoření a výbuch v oblasti horní hranice obvykle doprovázen u organických sloučenin tvorbou sazí.[17]

V průmyslové praxi se u prachů horní mez výbušnosti nedá používat jako bezpečnostní parametr, protože vlivem usazování koncentrace prachu ve směsi snadno klesne pod tuto mez. Taky pokud počítáme se spodní mezí výbušnosti, musíme brát v potaz všechny přítomný prach, tedy i prach v usazeném stavu, který po případném rozvření může zvýšit koncentraci prachu ve směsi.

U hořlavých kapalin vzniká na základě povrchové teploty přímá souvislost mezi parciálním tlakem a koncentrací směsi. Koncentrace směsi, resp. parciální tlak, jsou zobrazeny jako funkce teploty pomocí křivek tlaku a par. Každé teplotě je přiřazena určitá koncentrace. Teploty přiřazené koncentraci (v obj. %) spodní a horní meze výbušnosti se označují jako spodní a horní, respektive teplotní meze (hranice) výbušnosti. [17]

Problematikou hořlavých kapalin se tato práce nezabývá, proto ji zde nebudeme podrobněji rozebírat.

2.2.4. Ovlivnění maximálních výbuchových parametrů a průběhu výbuchu

Průběh výbuchu a maximální výbuchové parametry ovlivňuje řada věcí. Kromě počátečních podmínek jako je tlak, teplota atd. jsou to i vlastnosti materiálu samotného (např. vlhkost, velikost částic) a v neposlední řadě i vlastnosti prostoru, kde se výbuch šíří. Ve volném prostoru to mohou být různé překážky, jako stromy nebo budovy, místnostech zase dochází k odrazům tlakových vln. V laboratorních podmínkách, při našem měření, se jedná především o velikost a tvar nádoby. Velmi důležitým faktorem, který ovlivňuje výbuchové parametry je vytváření hybridních směsí, což má tato práce za cíl ověřit a přesněji stanovit. Co se týče faktorů ovlivňujících průběh výbuchu a maximální výbuchové parametry, jedná se zejména o:

Velikost objemu a tvar nádoby

Z hlediska geometrie dělíme nádoby na kubické, podlouhlé a na potrubí, kde délka mnohonásobně přesahuje průměr. Kubické nádoby jsou definovány tím, že nádoba má délku l menší nebo rovnu dvěma průměrům d :

$$\frac{d}{l} \leq 2d \quad (3)$$

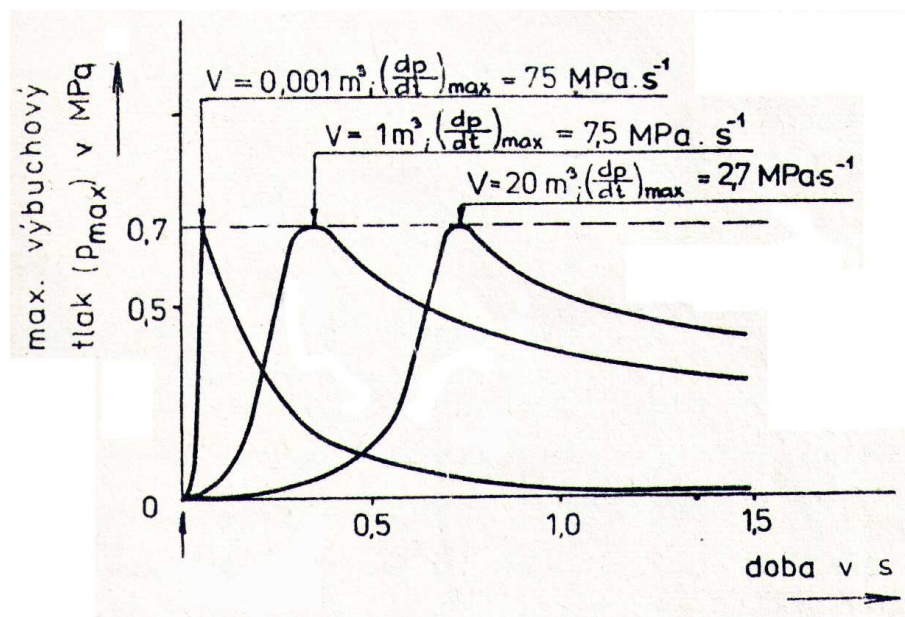
Velmi často se jedná o nádoby kulovitěho tvaru. S rostoucím objemem nádoby rychlost narůstání výbuchového tlaku klesá, jak je patrné z obrázku 2-6.

Objemovou závislost rychlosti narůstání výbuchového tlaku v kubické nádobě lze vyjádřit vztahem, který je označován jako **kubický zákon** a má tvar:

$$\left(\frac{dp}{dt} \right)_{\max} \cdot V^{\frac{1}{3}} = konst = K \quad (4)$$

kde:

$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max}$...maximální rychlost narůstání výbuchového tlaku v $\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1}$,
V	...objem nádoby v m^3 ,
K	...kubická konstanta v $\text{MPa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Obr. 2-6: Vliv objemu při výbuchu směsi propanu se vzduchem, zdroj [16]

Objem nádoby tedy podstatně ovlivňuje prudkost výbuchu, když součin maximální rychlosti narůstání výbuchového tlaku vynásobený třetí odmocninou objemu nádoby je konstanta. [16]

U plynů a par hořlavých kapalin se tato konstanta značí K_g a je specifickou látkovou konstantou, dodržíme-li tyto podmínky:

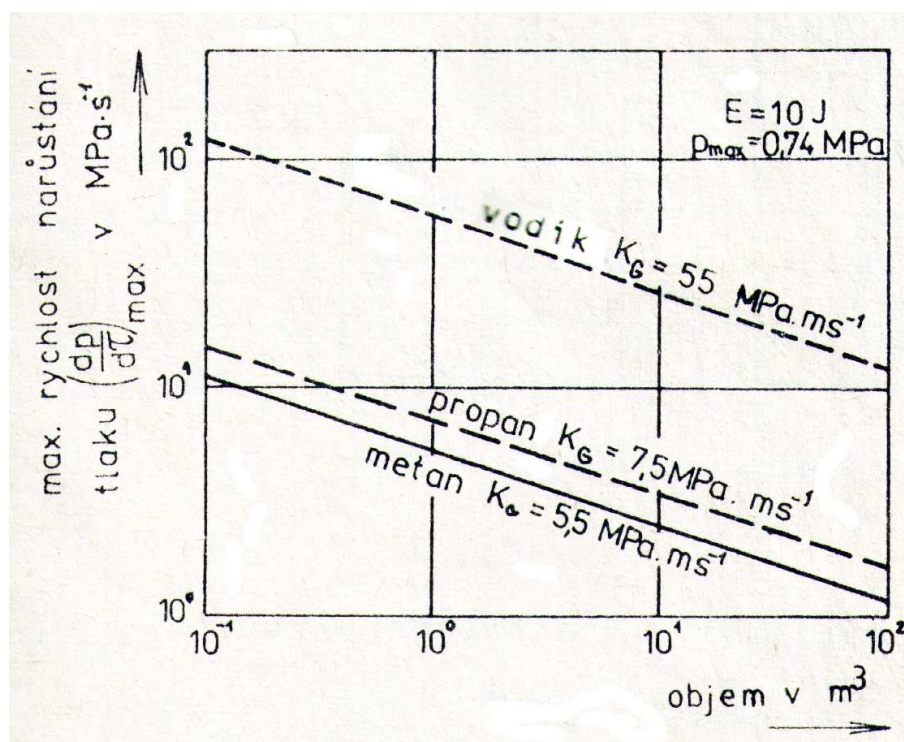
- optimální koncentraci výbušné směsi
- stejný tvar nádoby
- stejný stupeň turbulence směsi plynu
- stejný způsob a energie iniciace.

Hodnoty maximálního výbuchového tlaku jsou prakticky nezávislé na velikosti objemu.

Údaj maximální rychlosti nárůstu tlaku je tedy bez současného udání velikosti objemu, ve kterém byl naměřen, pro popis výbuchu nedostatečný.

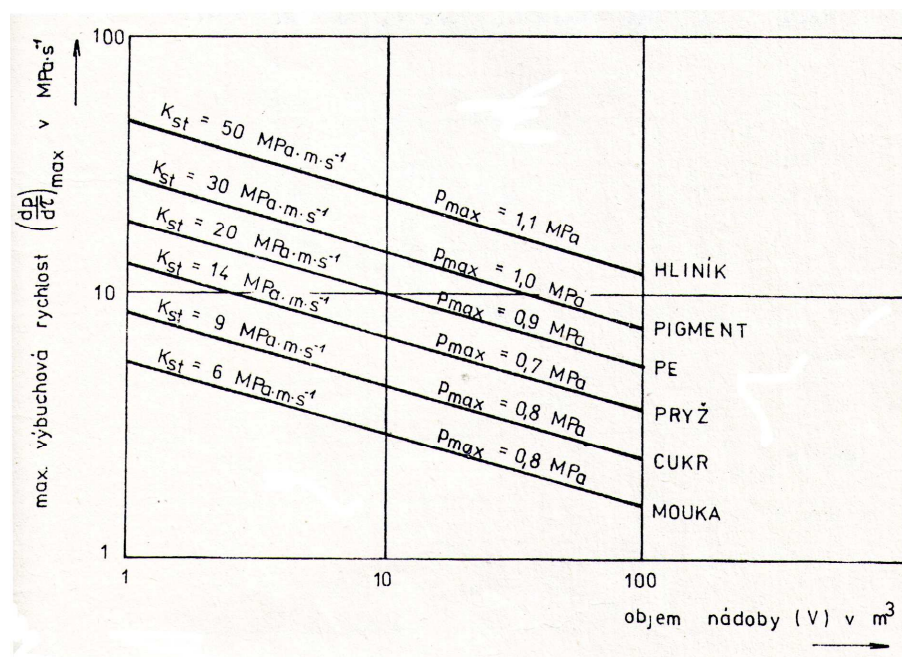
Na obrázku 2-7 je graficky znázorněna závislost rychlosti narůstání výbuchového tlaku na objemu nádoby pro vybrané hořlavé plyny.

Je vidět, že výbuch propanu je zhruba o 50% prudší než výbuch metanu a výbuch vodíku je prudší dokonce až o asi 1000%. [16]



Obr. 2-7: Objemová závislost prudkosti výbuchu vybraných hořlavých plynů, zdroj [16]

U hořlavých prachů se kubická konstanta označuje K_{st} . Na obr 2-8 je znázorněna objemová závislost rychlosti narůstání výbuchového tlaku pro vybrané hořlavé prachy. Při porovnání je vidět, že výbuchy hořlavých prachů mohou probíhat stejně prudce, jako u hořlavých plynů.



Obr. 2-8: Objemová závislost prudkosti výbuchu vybraných hořlavých prachů, zdroj [16]

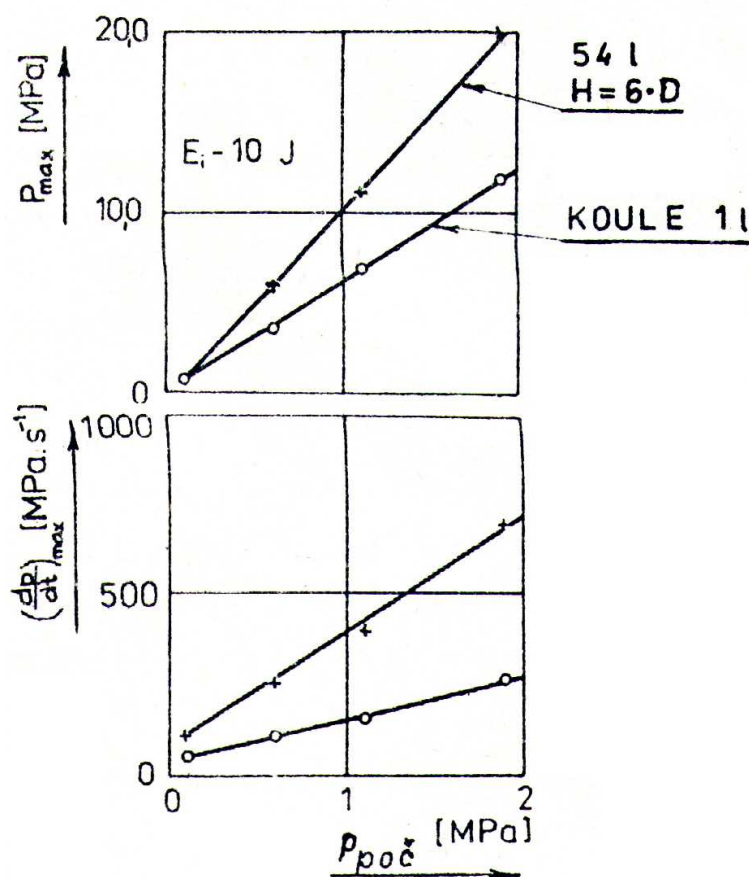
Pokud dodržíme stejné podmínky, jako jsem uváděl u hořlavých plynů, může být i kubická konstanta K_{st} u prachovzduchových směsí bezpečnostním parametrem. Podle [21] lze podle ní hořlavé prachy rozdělit do tří tříd (tabulka 2-1). Některé prameny např. [19][15] uvádějí ještě třídu St 0 – nevýbušné.

Tabulka 2-1: Rozdělení hořlavých prachů do tříd podle K_{st}

Třída	K_{st} [MPa.m.s ⁻¹]
St 1	0-20
St 2	20-30
St 3	> 30

Co bylo doposud řečeno se vztahuje na kubické nádoby. U podlouhlých nádob a potrubí kubický zákon neplatí. V podlouhlých nádobách při iniciaci ve středu nádoby se šíří plamen v kulových plochách jen v počáteční fázi. V další fázi se původně kulové čelo plamene zdeformuje podle tvaru nádoby, a rychle se šíří v osovém směru k čelům nádoby. Před čelem plamene dochází k předkomprimaci směsi, to vede k zvýšení prudkosti výbuchu a k superpozici tlakových kmitů. [16]

Vliv tvaru nádoby na výbuchové parametry metanu je názorně vidět na obrázku 2-9. Výbuchové parametry jsou naměřeny v kulové nádobě o objemu 1 l a v podlouhlé nádobě o objemu 54 l, kde výška nádoby činila šest průměrů ($\frac{H}{D} = \frac{6}{1}$).



Obr. 2-9: Vliv tvaru nádoby na výbuchové parametry metanu při různých počátečních tlacích, [16]

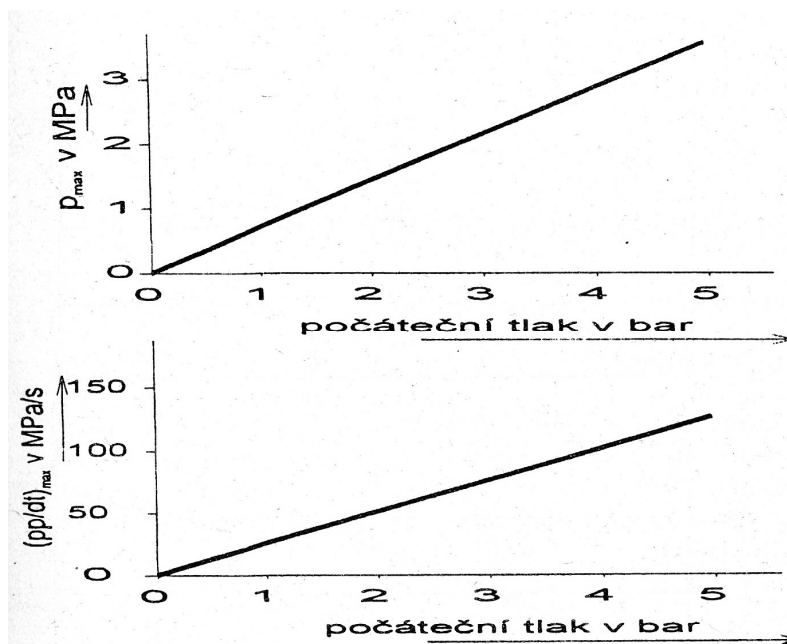
Při normálním tlaku ($p_{poc} = 0,1$ MPa) se sice v důsledku větších tepelných ztrát nedosáhne v podlouhlé nádobě vyššího maximálního výbuchového tlaku než 0,7 MPa, ale s narůstajícím počátečním tlakem je zde v důsledku změněného průběhu spalování možno pozorovat vyšší hodnoty maximálního výbuchového tlaku ve srovnání s kulovou nádobou.

Podobně je tomu u $(\frac{dp}{dt})_{max}$. Ačkoliv by podle kubického zákona měla být ve větší nádobě menší maximální rychlost narůstání výbuchového tlaku, je zřejmé, že

hodnota $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max}$ je prakticky nezávisle na počátečním tlaku více než dvojnásobná ve větší 54 litrové nekubické nádobě.

Počáteční tlak v okamžiku iniciace

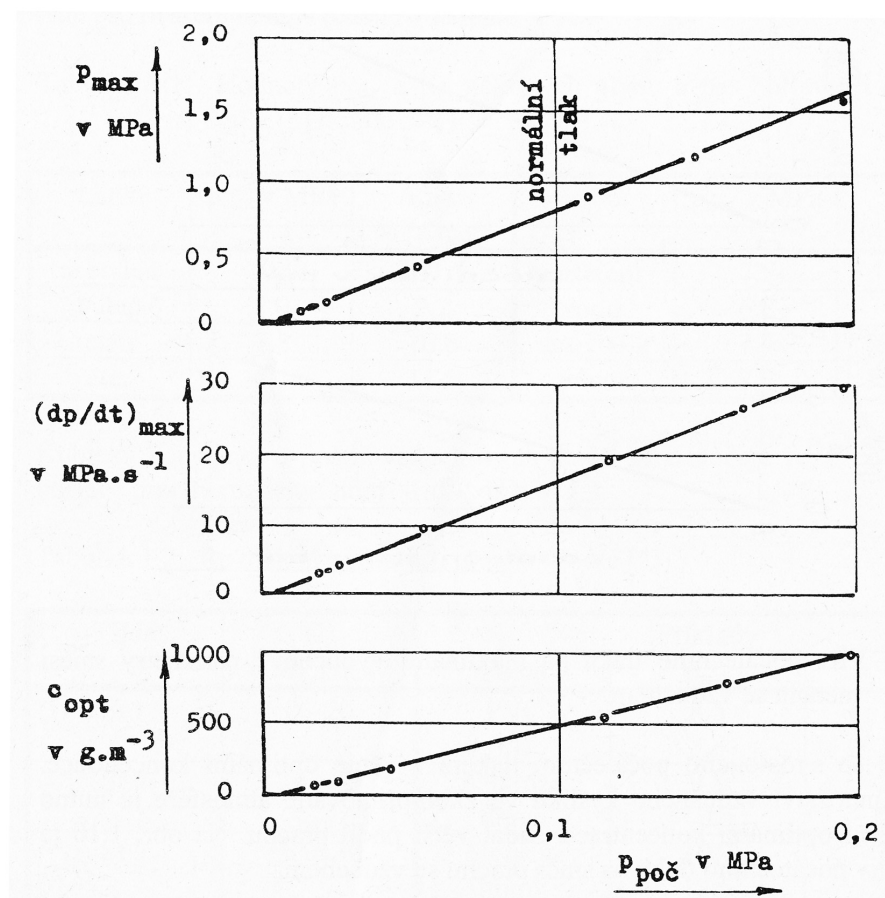
Tlak v okamžiku iniciace se také nazývá pracovní tlak. Maximální výbuchové parametry se s rostoucím počátečním tlakem rovnoměrně zvyšují, jak ukazuje obr. 2-10. U plynů počáteční tlak neovlivňuje optimální koncentraci. Stlačením se ovšem zvětšuje množství směsi o optimální koncentraci. [18]



Obr. 2-10: Vliv počátečního tlaku na výbuchové parametry směsi metanu se vzduchem, zdroj [1]

Snížení počátečního tlaku zmírňuje následky výbuchu a dá se považovat za ochranné preventivní protivýbuchové opatření. Při dostatečném snížení počátečního tlaku, lze dosáhnout až toho, že směs již není schopna samostatného šíření výbuchu při dané iniciační energii.

U prachů se s rostoucím počátečním tlakem zvyšuje optimální koncentrace. Ve zkomprimované atmosféře je větší množství kyslíku, proto je pro dosažení optimální koncentrace nutno dodat větší množství prachu. Toto je znázorněno na obr. 2-11. [1]

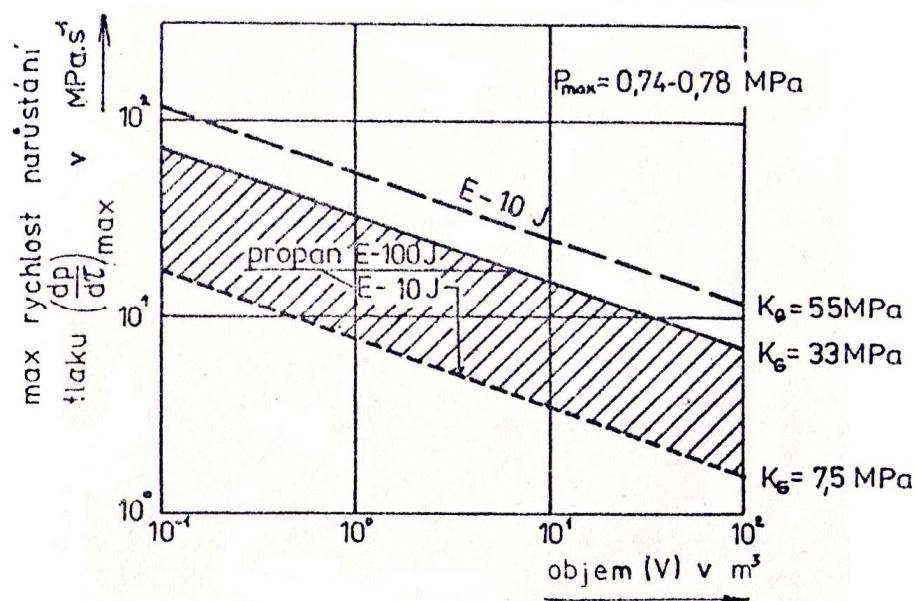


Obr. 2-11: Vliv počátečního tlaku na maximální výbuchové parametry směsi prachu škrobu se vzduchem, zdroj [1]

Vliv iniciační energie

S rostoucí iniciační energií se lineárně zvyšuje zejména maximální rychlost narůstání maximálního výbuchového tlaku, jak je znázorněno na obrázku 2-12 pro směs propanu se vzduchem.

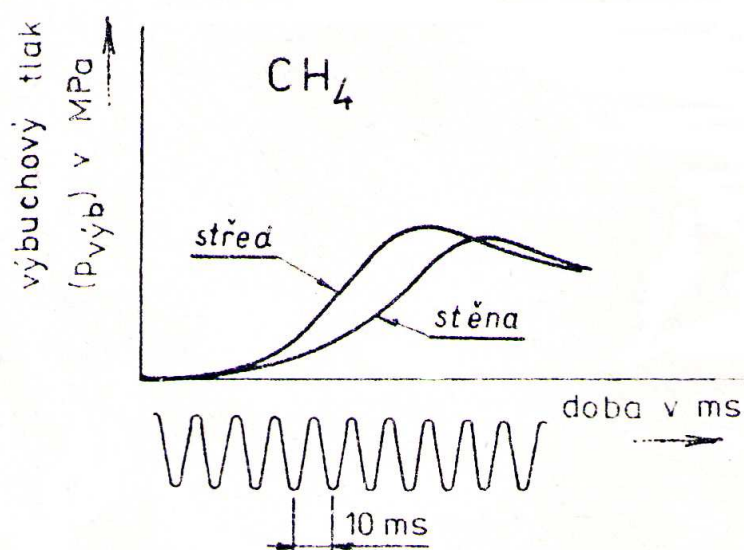
Nízkou iniciační energií se některé směsi nedají iniciovat. Při zkoušení vlastností směsí se jako standardní iniciační energie používá 10 J pro plyny a páry hořlavých kapalin, 10 KJ (10 000 J) pro prachy a 1 kJ pro mlhy [34]. Některé látky ovšem není možno touto energií iniciovat, takže by se omylem daly považovat za nevýbušné, přitom při vyšších iniciačních energiích se chovají jako silné výbušniny. Proto při posuzování dané směsi je nutno ověřit negativní výsledek ještě při dostatečně vysoké iniciační energii.[1]



Obr. 2-12: Vliv velikosti iniciační energie na prudkost výbuchu propanu, zdroj [16]

Maximální výbuchový tlak je prakticky přímo úměrný počátečnímu tlaku v okamžiku iniciace a velikostí iniciační energie prakticky není ovlivněn.

Na velikost $(\frac{dp}{dt})_{\max}$ má také vliv poloha iniciačního zdroje. Největších hodnot nabývá, když je směs iniciována ve středu nádoby. Při iniciaci u stěny přichází plamen mnohem dříve do styku se stěnou nádoby, což se projeví menší rychlostí narůstání výbuchového tlaku, jak je vidět na obrázku 2-13. Maximální výbuchový tlak se přitom nezmění.[16]

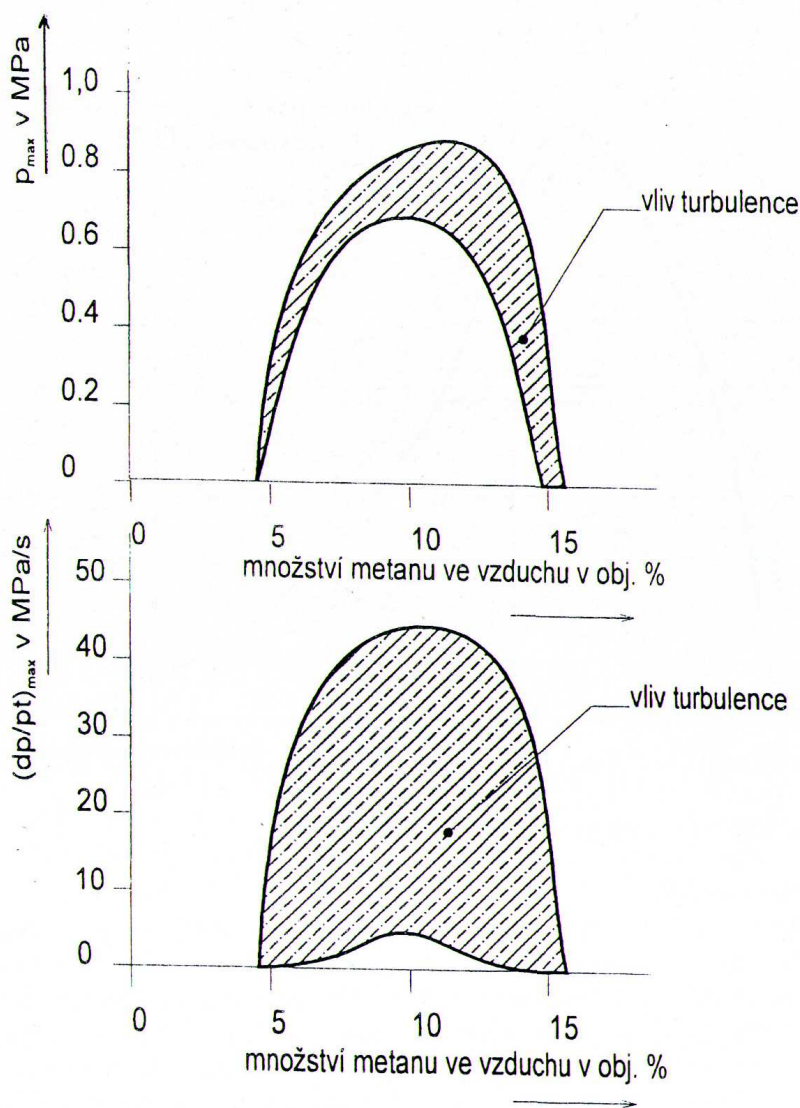


Obr. 2-13: Vliv místa iniciace na rychlost narůstání výbuchového tlaku směsi metanu se vzduchem,

[16]

Vliv turbulence

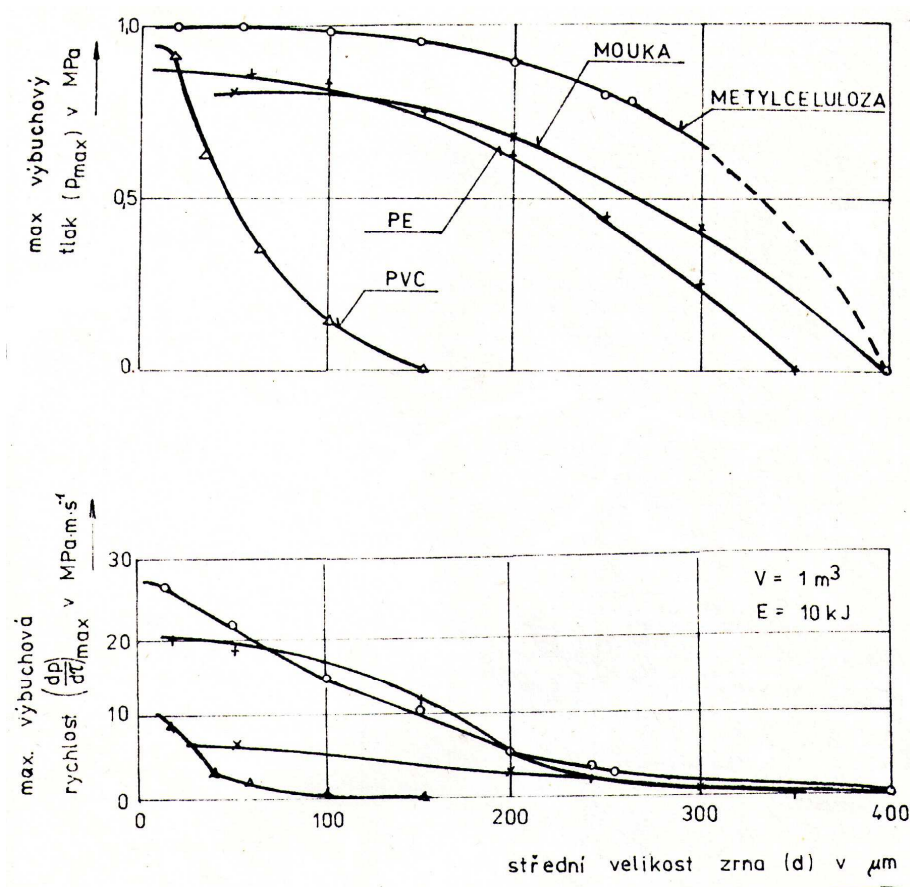
S rostoucí turbulentní směsí v okamžiku iniciace se zvyšují maximální výbuchové parametry, zejména maximální rychlost narůstání výbuchového tlaku. U turbulentní směsi nemá plamen kulový tvar a čelo plamene je značně roztrhané. Díky tomu tedy čerstvá neshořelá směs přichází do styku s plamenem ve větší ploše než je tomu při kulovitém šíření čela plamene. Velmi výrazný nárůst parametrů je u plynu a par s nízkou klidovou rychlostí hoření (např. metan, u metanovzduchové směsi činí nárůst asi 700%), naopak u plynů a par s vysokou klidovou rychlostí hoření (např. vodík) je nárůst parametrů menší. Vliv turbulence na výbuchové parametry metanu je znázorněn na obrázku 2-14. [12]



Obr. 2-14: Vliv turbulence na výbuchové parametry metanu, zdroj [1]

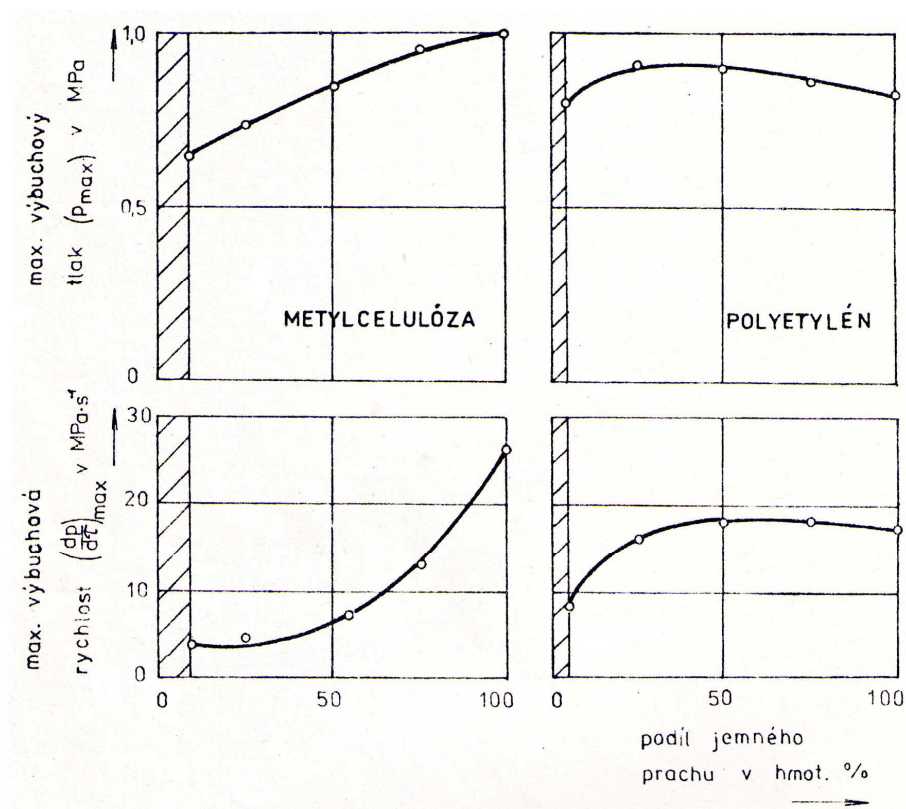
Vliv velikosti částic u prachu

S rostoucí velikostí částic klesá velikost měrného povrchu, prach se stává méně reaktivní a výbuchové parametry se snižují. Velikost zrn se projevuje na ovlivnění parametrů výbuchu velmi výrazně, zejména na $(\frac{dp}{dt})_{\max}$, což je zřejmé z obrázku 2-15. Z obrázku 2-15 také vyplývá, že prachy o velikosti zrn větších než 400 μm nelze obecně přimět k výbuchu ani silným iniciačním zdrojem.



Obr. 2-15: Vliv velikosti zrna na výbuchové parametry hořlavých prachů (E_i 10KJ), zdroj [16]

Ovšem jak je patrné z obrázku 2-16, stačí jen malý přídavek jemných podílů prachu (cca 5 až 10 hmot. %) a směs je opět výbušná, přičemž výbuchový tlak dosahuje téměř hodnot maximálního výbuchového tlaku jemných podílů. Je taky nutno si uvědomit, že při manipulaci s prachem dochází k otěru a vnikají z větších částic menší. Proto není možné překročení mezního průměru zrna (400 μm) brát jako bezpečnostní parametr. [12]



Obr. 2-16: Vliv jemného podílu prachu u velikosti zrn na výbuchové parametry, zdroj [16]

Vliv obsahu kyslíku v atmosféře

Zvýšený obsah kyslíku v oxidační atmosféře způsobí zvýšení výbuchových parametrů, kromě spodní meze výbušnosti. U LEL je kyslík v přebytku, a jelikož má kyslík přibližně stejnou měrnou tepelnou kapacitu jako dusík, nezpůsobí náhrada dusíku kyslíkem změnu. UEL se zvyšuje velmi výrazně.

Při větším množství kyslíku v atmosféře je větší i množství látky, která se účastní reakce. V důsledku většího množství reagující látky má směs vyšší teplotu plamene a tím i vyšší výbuchový tlak a maximální rychlost narůstání výbuchového tlaku. Pro porovnání jsou v tabulce 2-2 uvedeny maximální výbuchové parametry metanu a vodíku ve směsi se vzduchem a kyslíkem. V kyslíku mají oba plyny zhruba stejnou brizanci a významný je i nárůst maximálního výbuchového tlaku metanu z 0,74 MPa na 1,6 MPa. [12]

Tabulka 2-2: Výbuchové parametry metanu a vodíku ve směsi se vzduchem a kyslíkem, zdroj [12]

Oxidační činidlo	Vzduch		Kyslík	
Hořlavý plyn	P_{\max} [MPa]	K_G [Mpa.m.s ⁻¹]	P_{\max} [MPa]	K_G [Mpa.m.s ⁻¹]
Metan	0,74	5,5	1,60	270
Vodík	0,71	55,0	0,85	290

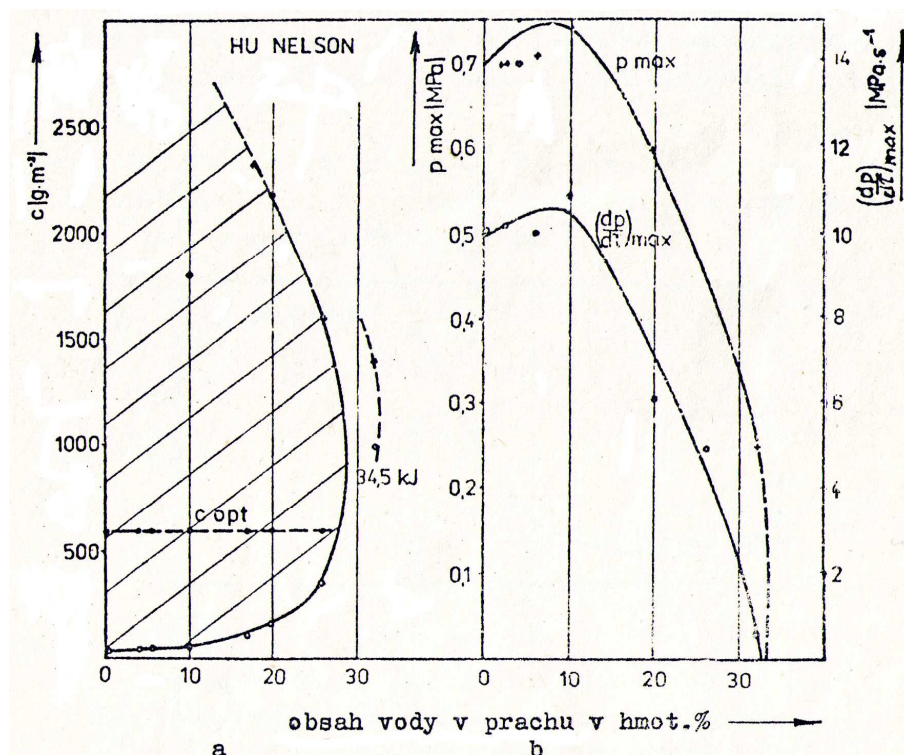
Opačný vliv má snížení obsahu kyslíku. Při poklesu obsahu kyslíku pod tzv. limitní obsah již nemůže dojít k výbuchu. Limitní hodnoty jsou závislé na druhu hořlavé látky a taky na druhu inertu, kterým se snížení koncentrace kyslíku dosáhne. U hořlavých prachů je koncentrace potřebná pro dosažení nevýbušnosti prachu podstatně vyšší než mezní koncentrace kyslíku při požáru prachu. [1]

Vliv obsahu vody (vlhkosti) u prachu

Zvýšení obsahu vody v prachu snižuje maximální výbuchové parametry a při určitém obsahu potlačuje jeho výbušnost úplně. To je znázorněno na obrázku 2-17 na příkladu hnědého uhlí ze sloje Nelson. I při trojnásobné iniciační energii 34,5 kJ je toto uhlí při obsahu vody 32 obj. % již nevýbušné (Standardní iniciační energie pro zkoušení prachů je na VA-250 11,5 kJ). Na obrázku 2-17 je patrné i uzavírání rozsahu výbušnosti a hodnota optimální koncentrace. Obdobně se chová i černouhelný prach, jen jeho limitní obsah vody pro dosažení nevýbušnosti je nižší (cca 15-20 hmot. %). [16]

Z tohoto je patrné, že smáčení prachů vodou se dá považovat za velmi účinné inertizační opatření. Ovšem toto opatření má jednu nevýhodu a tou je nestálý účinek – voda se vypařuje. Také mohutné iniciační zdroje, jako třeba výbuch metanu, způsobí odpaření vody, rozvíření prachu a následnou mohutnou explozi prachu. Při pokusech v Polsku zjistili, že i při 40 hmot. % vody v prachu počáteční výbuch 10m³ stechiometrické směsi metanu se vzduchem stačí vodu odpařit, prach rozvířit a způsobit následný výbuch uhelného prachu o parametrech vyšších, než bez inetrizace vodou. [16]

I přes tuto nevýhodu se voda v praxi často používá. Pokud nehrozí výše zmíněné nebezpečí silného iniciačního zdroje, který by vodu mohl vysušit, je toto opatření naprosto spolehlivé. Při vyšším obsahu vody (cca 25 – 35 obj. % - podle druhu prachu) se tvoří kaše a prach je prakticky nerozvířitelný. Proto se ani v přítomnosti malého hořlavého plynu nemůže tvořit hybridní atmosféra.[16]



Obr. 2-17: Vliv obsahu vody v hnědouhelném prachu na jeho meze (a) a maximální výbuchové parametry (b), zdroj [16]

Vliv počáteční teploty

Se zvyšující se počáteční teplotou maximální výbuchové parametry rostou. Zvyšuje se zejména rychlost narůstání maximálního výbuchového tlaku. Je to dáno tím, že se zvýšenou teplotou roste reakční rychlost.

Spojené nádoby

Jsou-li nádoby spojené potrubím, může se výbuch přenést z jedné nádoby do druhé. Vlivem předkomprimaci a turbulence dochází ke značnému zvýšení maximálních výbuchových parametrů. Touto problematikou se ale tato práce nebude podrobněji zabývat.

Vytváření hybridních směsí

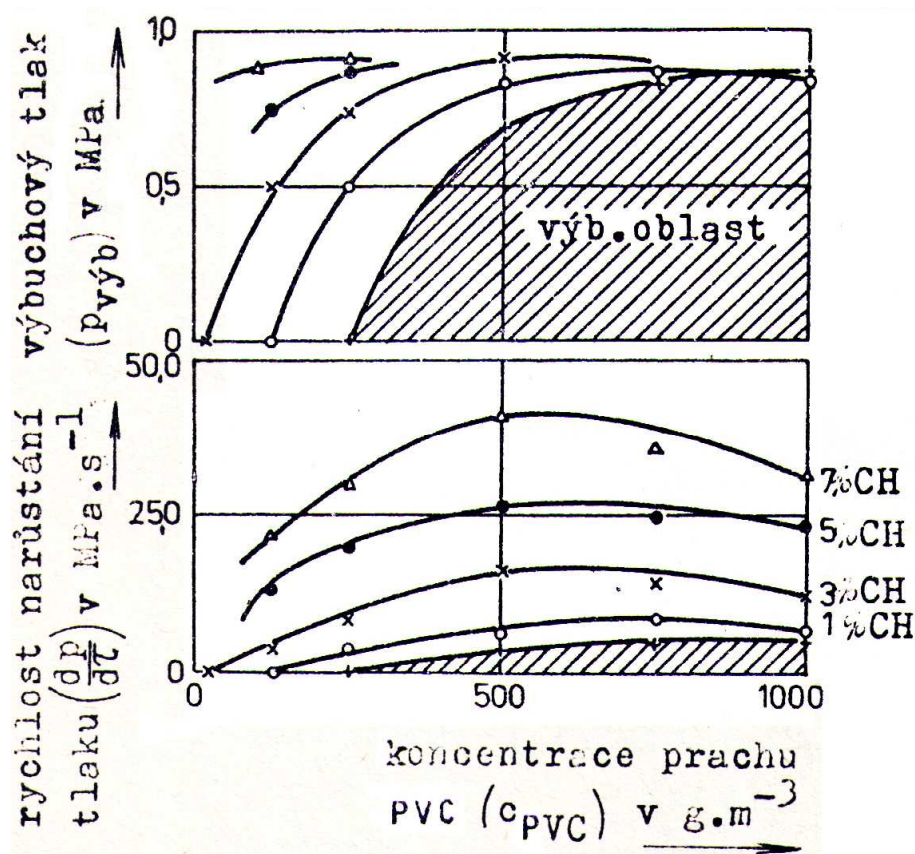
Vytváření hybridních směsí velmi silně ovlivní maximální výbuchové parametry. Vzhledem k povaze práce, tomuto vlivu bude věnována samostatná kapitola.

3. Hybridní směsi

První poznatky o chování hybridních směsí jsou datovány z roku 1885, kdy Engler míchal saze dřevěného uhlí s metanem a svítiplynem, ještě za nevýbušných koncentrací a přitom zjistil, že tyto směsi jsou výbušné. Další rozsáhlejší zkoumání přišlo až o sto let později s rozvojem hornictví.

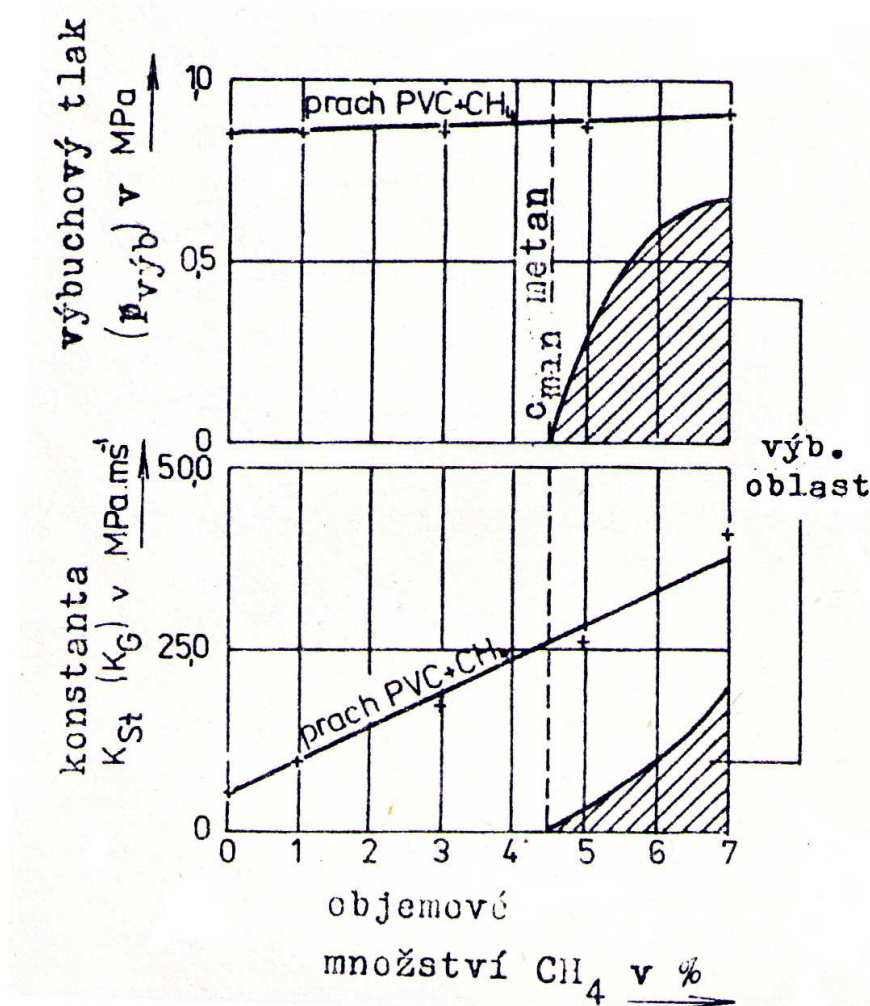
Bylo zjištěno, že je-li k prachovzduchové směsi přimícháno malé množství výbušového plynu nebo par hořlavé kapaliny, prudkost výbuchu výrazně stoupá a vybuchuje i pod spodní mezí výbušnosti. Maximální výbuchové parametry se zvyšují, spodní mez výbušnosti, minimální iniciační energie a optimální koncentrace se prudce snižují. [27]

Na obrázku 3-1 je vidět vliv příměsi metanu na výbuchové parametry prachu PVC (střední velikost zrn $d_{stř} = 14 \mu m$). Spodní mez výbušnosti prachu PVC leží poměrně vysoko, ve směsi se vzduchem činí $250 g \cdot m^{-3}$. [16]



Obr. 3-1: Výbuchové parametry směsi PVC/metan/vzduch (nádobu 1m³, $E_i = 10kJ$), zdroj [16]

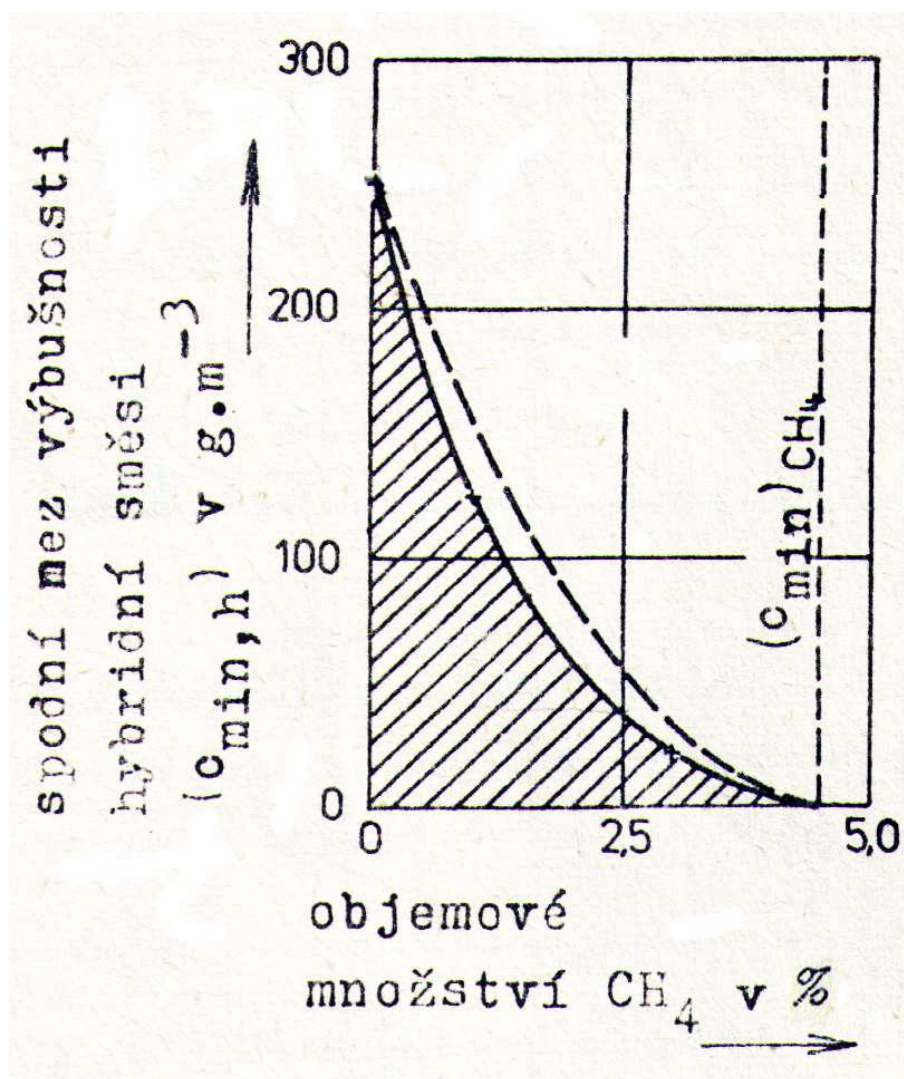
S rostoucím obsahem metanu se posouvá optimální koncentrace prachu za současného zvýšení maximálních výbuchových parametrů. Toto zvýšení se týká zejména rychlosti narůstání maximálního výbuchového tlaku $(\frac{dp}{dt})_{\max}$, zatímco maximální výbuchový tlak se mění jen málo, jak je patrné z obrázku 3-2. U obou těchto parametrů je ovšem znatelný lineární růst. Ovlivnění prudkosti je hlavně výrazné pod spodní hranicí výbušnosti plynu.



Obr. 3-2: Výbuchové parametry směsi PVC/metan/vzduch, zdroj [16]

Výskyt hybridní směsi představuje mimořádné nebezpečí, protože výbuch je možný už při velmi malém množství hořlavého prachu (pod jeho dolní mezí výbušnosti) i hořlavého plynu (pod jeho dolní mezí výbušnosti). Hybridní směs je možno iniciovat podstatně nižší energií než původní prachovzduchovou směs. [12]

Při našem měření jsme zkoušeli výbušnost směsi 80% LEL prachu a 80% LEL plynu a tato směs byla výbušná. U inertizovaných prachovzduchových souborů je pokles spodní meze ještě větší. Vliv obsahu metanu ve směsi na spodní mez výbušnosti uhelného prachu je znázorněn na obrázku 3-3.



Obr. 3-3: Vliv příměsi metanu na LEL prachu PVC ($d_{\text{stř}} = 14 \mu\text{m}$), zdroj [16]

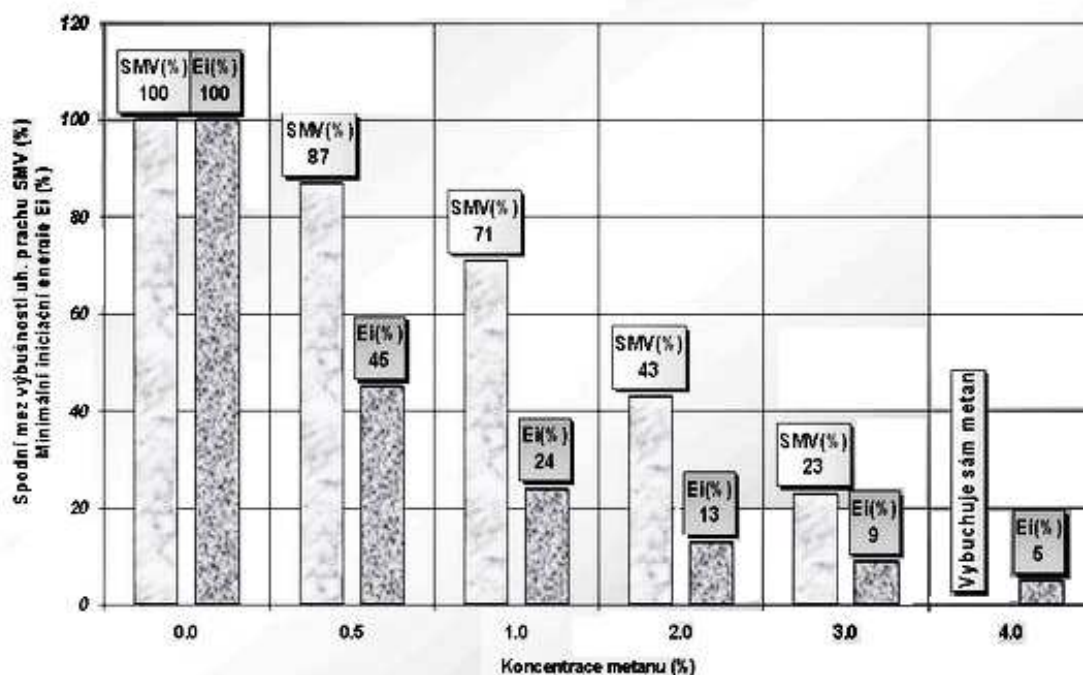
Minimální iniciační energie hybridní směsi prudce klesá s rostoucím obsahem hořlavého plynu a blíží se hodnotám minimální iniciační energie hořlavého plynu. Jiskry s malým obsahem energie, které nejsou normálně schopny zapálit směs prachu se vzduchem, mohou tedy iniciovat danou hybridní směs. [16]

Také obtížně zapalitelné výbušné soubory, které vyžadují vysokou iniciační energii, se s hybridní příměsí stávají velmi nebezpečnými. Například uhelný prach

koksovatelného uhlí o nízkém obsahu prchavé hořlaviny (11 hmot. %), který je při použití standardní iniciační energie 10kJ nevýbušný ještě při obsahu metanu 1,5 obj. %, se již při 3 obj.% metanu chová jako velmi výbušný soubor se spodní mezí výbušnosti pod 40 g.m^{-3} ; nebo prach PVC o středním průměru zrna $d_{stf} = 100 \text{ }\mu\text{m}$, který nelze přivést k výbuchu energií 10 kJ, již s příměsí 1 obj. % metanu ve vzduchu tvoří výrazný rozsah výbušnosti, který se stoupajícím obsahem hořlavého plynu stále rozšiřuje a prudkost výbuchu se výrazně zvyšuje. [16]

Na prudkost výbuchu mají plyny nebo páry hořlavých kapalin s malou normální rychlostí hoření silnější vliv než plyny nebo páry s vysokou rychlostí hoření.

Na obrázku 3-4 je znázorněna závislost spodní meze výbušnosti uhelného prachu a minimální iniciační energie uhelného prachu na koncentraci metanu podle [28]



Obr. 3-4: Závislost spodní meze výbušnosti LEL uhelného prachu a minimální iniciační energie uhelného prachu na koncentraci metanu, zdroj [28]

Hybridní směsí, která byla zvolena pro účely této práce pro zkoušení ve spolupráci s VVUÚ, byla směs metanu a černého uhlí.

4. Měřicí zařízení a postupy

Veškeré měření a zkoušení vzorků bylo uskutečněno ve spolupráci s VVUÚ, a.s. Dříve Vědeckovýzkumný uhelný ústav byl založen před více jak padesáti lety s posláním řešit především problematiku bezpečnosti a technologií používaných v hlubinných dolech. V současné době je VVUÚ, a.s. úspěšně se rozvíjející společností, podnikající v mnoha oborech, mezi něž patří i zkušebnictví. Zkušební laboratoř č. 1025 akreditovaná ČIA je akreditovaná pro akreditaci podle ČSN EN ISO/IEC 17025 a nabízí služby deseti zkušeben, mezi které patří i zkušebna výbušnosti hořlavých prachů, plynů a par kapalin, kde byly uskutečněny naše měření.

V souladu se zadáním této práce jsme zkoušeli černouhelný prach, jako hořlavý plyn byl zvolen metan, protože jeho charakteristiky jsou dobře známy (používá se jako kalibrační plyn) a také proto, že je zde možné srovnání s jinými autory. Měření bylo uskutečněno na výbuchovém autoklávu o objemu 20 litrů (VA – 20).

4.1. Výbuchový autokláv VA – 20

Výbuchový autokláv VA – 20 je laboratorní zařízení zkonstruované Adolfem Kühnerem (AG Basilej, Švýcarsko). V anglické literatuře se nejčastěji setkáme s názvem „20 litre-sphere“ nebo „20-l-Apparatus“. [29]

Zařízení standardně sestává z:

- výbuchové komory
- systému disperze a iniciace
- systému měření tlaku
- automatického kontrolního systému

V naší sestavě ještě doplněno o:

- systém dávkování příměsi hořlavého plynu

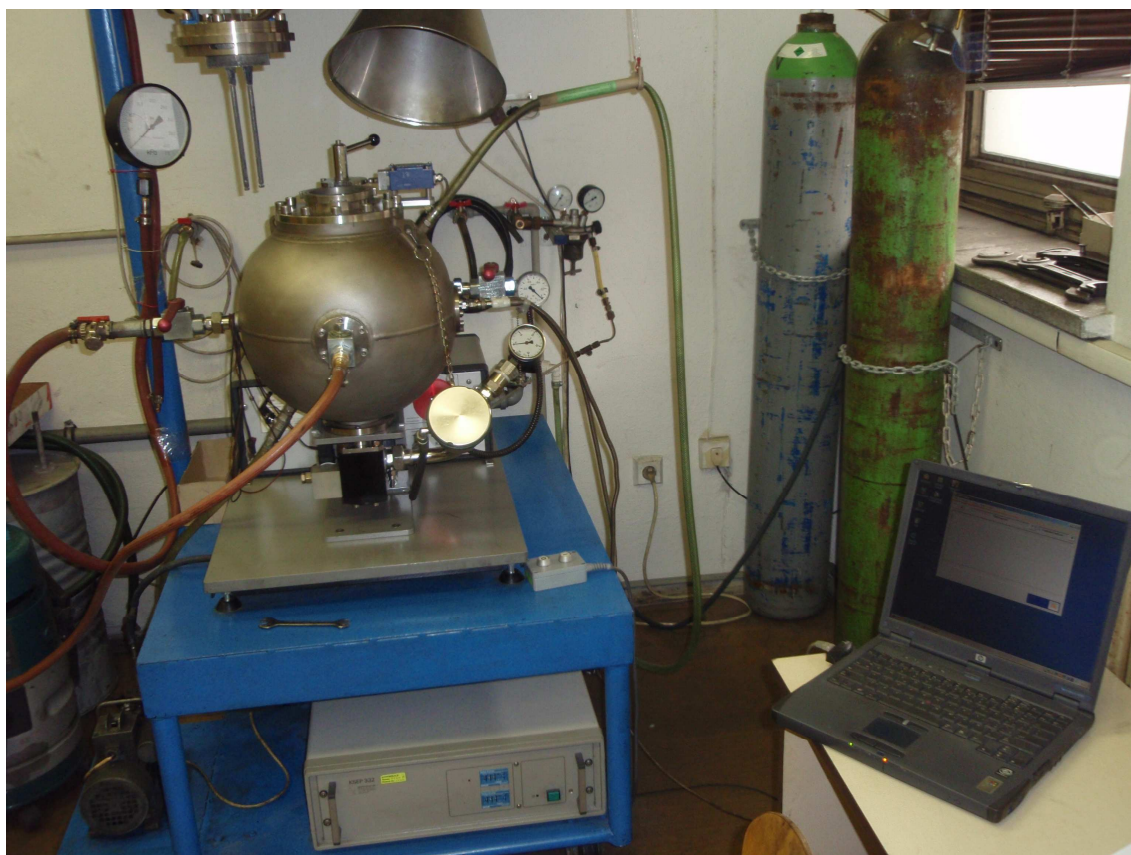
A schematic diagram of a vacuum furnace system. The central component is a cylindrical furnace chamber (1) with a top flange (3) and a bottom flange (10). A central vertical rod (12) with a handle (13) is used to move a sample (11) inside. The chamber is connected to a vacuum system via a main line (14) and a side line (15). A vacuum pump (2) is connected to the side line, with a pressure gauge (16) and a valve (17). A gas inlet (18) is also shown. A control system (4) is connected to the pump and the chamber. A power supply (5) is connected to the pump. A gas cylinder (6) is connected to the chamber via a line (21). A gas inlet (7) is connected to the chamber via a line (8). A gas inlet (9) is connected to the chamber via a line (10). A gas inlet (11) is connected to the chamber via a line (12). A gas inlet (13) is connected to the chamber via a line (14). A gas inlet (15) is connected to the chamber via a line (16). A gas inlet (17) is connected to the chamber via a line (18). A gas inlet (19) is connected to the chamber via a line (20). A gas inlet (21) is connected to the chamber via a line (22).

1...zkusební nádoba	12...iniciace, chemický palník
2...kontrolní jednotka KSEP 310	13...iniciace, elektrody
3...tlaková čidla	14...zdroj napájení
4...měřicí a kontrolní jednotka KSEP 332	15...tlaková láhev se vzduchem
5...počítač, software KSEP 6.0	16...manuální ovládač
6...odsávání pro odvod zplodin	17...vodní plášť
7...zásobník s metanem	18...přívod vody
8...systém pro dávkování metanu	19...odvod vody
9...kompresor	20...vysavač R2D2
10...rozprašovací tryska	21...odvod zplodin
11...zásobník na vzorek prachu	

Naspodu výbuchové komory je vstupní ventil, ke kterému je připojen zásobník na vzorek prachu o objemu 0,6 litru. Hlavní vstup do komory je shora, otvorem o průměru 94 mm. V uzávěru otvoru jsou elektrody, sloužící k umístění palníku a iniciaci. Tímto otvorem se také provádí čištění po každém pokusu pomocí vysavače.

Z boku komory jsou dva uzávěry sloužící pro tlaková čidla, které jsou vyvedeny do jednotky KSEP 332. Tato jednotka vyhodnocuje údaje z obou nezávislých tlakových čidel jako funkci času, taky kontroluje ventily a systém iniciace. Jednotka KSEP 332 je spojena s počítačem, na kterém je nainstalován výrobcem dodávaný software KSEP 6.0, který dává výsledky měření v uživatelské podobě. [31]

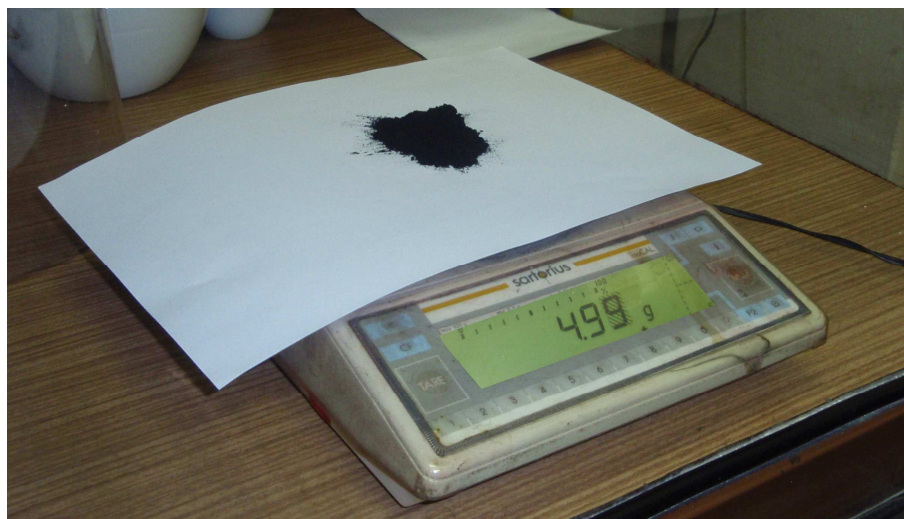
Kontrolní jednotka KSEP 310 je instalována jako pomocná jednotka, která ovládá přívod vzduchu, tlak v přístroji a disperzi vzorku. Vzorek je přiváděn pod tlakem přes rozprašovací trysku. Protože je navážka přiváděna vzduchem pod tlakem, je nutno upravit tlak v komoře, pomocí kompresoru (obr. 4-1 číslo 9), na podtlak 0,7 bar. Po rozprášení vzorku se tlak vyrovná na standardní ($101,325 \text{ kPa} = 1,01325 \text{ bar}$) a systém automaticky spustí iniciaci. [31]



Obr. 4-2: Výbuchový autokláv VA - 20

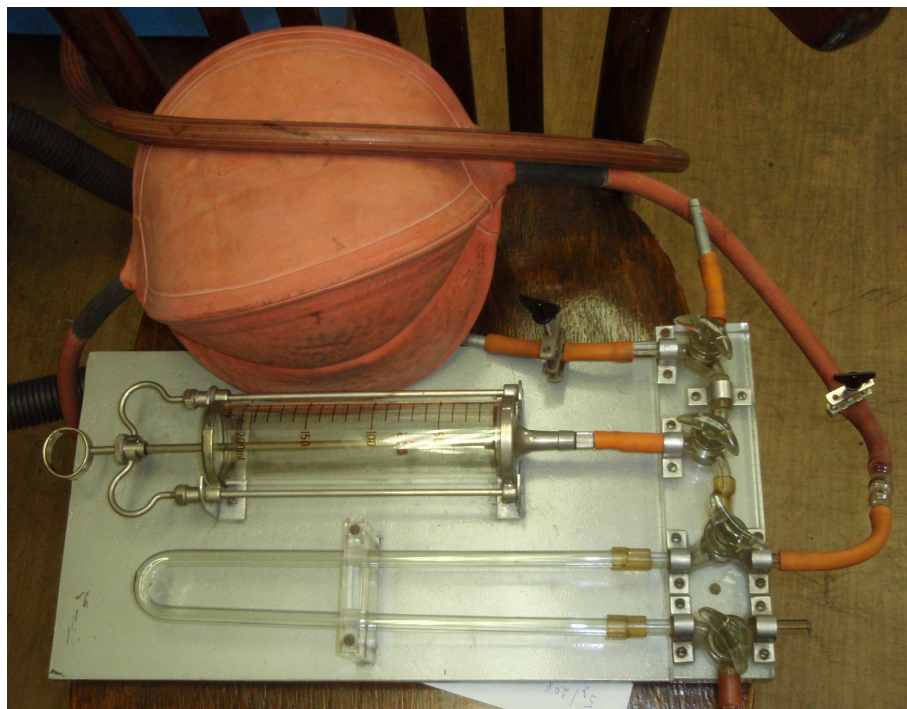
4.2. *Postup měření*

Pro měření vlivu příměsi metanu na výbuchové parametry uhelného prachu jsme se nejdříve museli rozhodnout, pro jakou koncentraci uhelného prachu budeme měření provádět. Rozhodl jsem se zvolit optimální koncentraci prachu bez příměsi, která činí 250. Tuto hodnotu jsem zvolil, protože zde výbuch prachu dosahuje nejvyššího maximálního tlaku a z hlediska praxe se jedná o hodnotu nejnebezpečnější, co se možných následků výbuchu týče. Hodnotu 250 g.m^{-3} bylo nutno přepočíst na objem našeho zařízení 20 litrů a vyšla nám hodnota navážky 5 g. Navážku nasypeme do nádoby k tomu určené (obr. 4-1 číslo 11).



Obr. 4-3: Navážka

V dalším kroku je nutno do komory přivést požadované množství metanu (postupně jsme přidávali 1 – 6 obj. %). V našem případě, jedno objemové procento metanu představuje 200 ml, dávkování je znázorněno na obr. 4-4. Metan byl přiváděn do komory ještě před vlastním rozprášením vzorku prachu. Tím, že je v komoře podtlak, došlo vlastním nasátím metanu do komory k jeho dokonalému rozvívání a vytvoření homogenní směsi se vzduchem, do které byl posléze rozprášen vzorek prachu. Tím, že přidáním určitého objemu metanu do komory zvýšíme v komoře tlak, bylo nutno upravit hodnotu podtlaku tak, aby po přidání požadovaného množství metanu byl výsledný podtlak 0,7 bar, před rozprášením prachu



Obr. 4-4: Dávkování metanu

Pro iniciaci jsme použili chemický palník o iniciační energii 10 kJ (obr. 4-5), což je standardní iniciační energie pro zkoušení prachů. Nicméně některé prameny uvádějí tuto energii používat pro větší zařízení o objemu 1 m^3 a pro objem 20 litrů volit energii menší a to 2 kJ [14], jiné zdroje uvádí energii 2,5 – 5 kJ [29], [30]. Pro naše měření ovšem není volba iniciační energie až tak důležitá, vzhledem k faktu, že jsme sledovali lineární nárůst maximálních výbuchových parametrů a naše měření jsme prováděli při optimální koncentraci uhelného prachu.



Obr. 4-5: Chemický palník, iniciační zdroj (10 kJ)

Palník umístíme mezi elektrody ve víku a komoru uzavřeme. Připravíme navážku, napustíme komoru požadovaným množstvím plynu a můžeme na počítači spustit zkoušku. Rozvíření prachu, iniciaci a vyhodnocení probíhá automaticky.

Po každé zkoušce musíme odsát zplodiny po výbuchu a zařízení vyčistit vysavačem.

Zkoušky provádíme za standardních laboratorních podmínek, tj. pracovního tlaku 101,325 kPa a teploty 20°C. Pracovní teplota uvnitř zařízení je udržována vodním pláštěm, jinak by působením výbuchu docházelo k ohřívání ocelové stěny komory a po několika měřeních by již další měření bylo nepřesné.

Použití dvou naprosto nezávislých tlakových čidel a kanálů zaručují dobré zabezpečení proti případným nepřesnostem v měření.

5. Měření vzorky

Pro vytvoření hybridní směsi a zkoumání vlivu procentuální příměsi hořlavého plynu na uhelné prachy jsme zvolili jako plyn metan. Metan je používán v laboratořích VVUÚ a.s. jako kalibrační plyn a jeho vlastnosti a výbuchové charakteristiky jsou dobře známy. Uhlíkový prach byl zvolen černouhelný prach původem z Ukrajiny, jehož výbuchové charakteristiky pracovníci VVUÚ a.s. také nedávno měřili na výbuchovém autoklávu VA – 250.

5.1. Uhlíkový prach

Jedná se o černé uhlí původem z Ukrajiny. Uhlí je sušené a mleté za účelem dosažení co největší jemnosti vzorku. Uhlí je mleté na velikost částic $< 40 \mu\text{m}$ (0,040 mm). Pro přesnější zjištění rozdělení zrn vzorku bylo provedeno stanovení zrnitosti síťovým rozbořem, podle [23]. Tyto charakteristiky a naměřené výsledky byly poskytnuty VVUÚ a.s.

Síťový rozbor:

Ke stanovení se používá vzorek s minimální vlhkostí, která ještě nezpůsobuje sdružování zrn vzorku a jeho lepení na síta.

Postup stanovení: pro vzorek s předpokládaným podílem zrn do 20 % nad 0,1 mm. Odváží se 10 g vzorku s přesností 0,01 g, který se mírným podtlakem, případně za pomoci štětce, prosévá postupně přes síta o velikosti ok 0,04 mm, 0,063 mm, 0,10 mm, 0,16 mm a 0,40 mm.

Výsledek: Výsledkem je procentuální podíl zrn, která jsou zadržena na daném a větších sítích (nadsítné). Naměřené hodnoty se zapisují do pracovního záznamu s vyznačením střední velikosti zrna (velikost zrna, kdy je 50 % nadsítného). Přesnost měření je 0,5% pro hrubé vzorky a 0,2% pro vzorky jemné.

Sítová analýza vzorku černouhelného prachu použitého pro naše měření je znázorněna v tabulce 5-1.

Tabulka 5-1: Sítový rozbor vzorku černouhelného prachu

Síto (mm)	Nadsítné (hm. %)
0,040	13,7
0,063	5,4
0,100	3,0
0,160	1,8
0,250	0,8
0,400	0,2
0,630	0

Střední velikost zrna je $< 0,040$ mm.

Další charakteristiky uhelného prachu:

Hrubá voda:	$W_{\text{ex}} = 5,0\%$
Analytická voda:	$W^{\text{a}} = 3,2\%$
Popel:	$A^{\text{a}} = 3,0\%$
Prchavé složky (odpaří se do 105°C):	$V^{\text{a}} = 34,8\%$
Fixní uhlík:	$C^{\text{a}} = 59\%$
LEL (při $E_{\text{i}} = 9000$ J):	$\text{LEL}_{9000} = 51 \text{ g.m}^{-3}$
LEL (při $E_{\text{i}} = 100$ J):	$\text{LEL}_{100} = 113 \text{ g.m}^{-3}$
Maximální výbuchový tlak:	$P_{\text{max}} = 7,3 \text{ bar}$
Maximální rychlost nárůstu výbuchového tlaku: ($V = 20$ l)	$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\text{max}} = 611 \text{ bar.s}^{-1}$
Maximální hodnota kubické konstanty:	$K_{\text{st, max}} = 166 \text{ m bar.s}^{-1}$

V tabulce 5-2 jsou uvedeny výbuchové parametry uhlého prachu naměřené na výbuchovém autoklávu VA – 20. Pro měření byla použita standardní iniciační energie 10 kJ.

Tabulka 5-2: Výbuchové parametry černouhlého prachu

Test	Koncentrace [g.m ⁻³]	P _{max} [bar]	(dp/dt) _{max} [bar.s ⁻¹]
1	60	4,4	73
1	125	6,5	246
1	250	7,5	518
1	500	6,9	619
1	750	6,2	426
1	1000	5,2	194
2	250	7,1	566
2	500	6,4	381
2	750	5,9	232
3	250	7,4	649
3	500	6,8	525
3	750	6,1	392
Ap	250	7,3	578
Ap	500	6,7	508
Ap	750	6,1	350

Ap... aritmetický průměr naměřených hodnot

Nejdůležitější hodnoty byly pro minimalizaci chyb měření neměřeny třikrát. Jako výsledná hodnota se bere aritmetický průměr těchto tří měření. Aritmetický průměr se vypočte jako součet naměřených hodnot podělen počtem měření:

$$Ap_{P_{\max, 250}} = \frac{\sum p_{\max}}{n} = \frac{7,5 + 7,1 + 7,4}{3} = 7,3 \text{ bar} \quad (5)$$

Obdobně byly získány i ostatní aritmetické průměry pro maximální tlak při koncentracích 500 g.m⁻³ a 750 g.m⁻³ a také hodnoty aritmetického průměru pro maximální rychlost nárůstu výbuchového tlaku pro koncentrace 250 g.m⁻³, 500 g.m⁻³ a 750 g.m⁻³.

Pro lepší možnost vzájemného porovnávání naměřených výsledků je nutné přepočítat hodnoty $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max}$ naměřené na výbuchové komoře o objemu 20 litrů (0,02 m³) podle kubického zákona (rovnice (4)) na hodnoty kubické konstanty K_{st} , které jsou na objemu měřicího zařízení nezávislé.

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max} \cdot V^{\frac{1}{3}} = K_{st} \quad (6)$$

Pro koncentraci 60 g.m⁻³:

$$73 \cdot 0,02^{\frac{1}{3}} = K_{st,60} = 19,8 \text{ bar.m.s}^{-1}$$

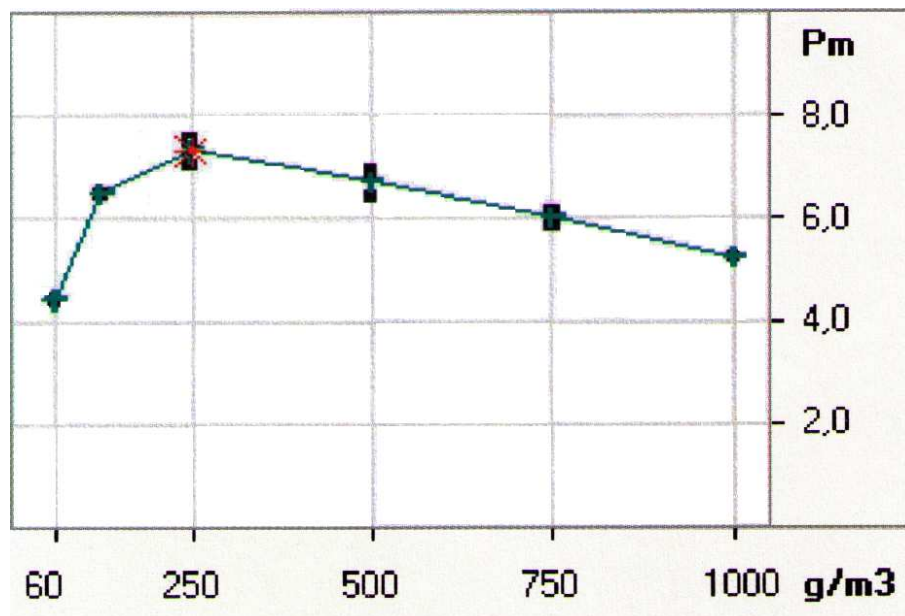
Obdobným způsob dopočítáme i hodnoty pro ostatní koncentrace. Všechny hodnoty K_{st} naměřených výsledků černouhelného prachu jsou uvedeny v tabulce 5-3.

Tabulka 5-3: Hodnoty K_{st} černouhelného prachu

Test	Koncentrace [g.m ⁻³]	$(dp/dt)_{\max}$ [bar.s ⁻¹]	K_{st} [bar.m.s ⁻¹]
1	60	73	20
1	125	246	67
1	250	518	141
1	500	619	168
1	750	426	116
1	1000	194	53
2	250	566	154
2	500	381	103
2	750	232	63
3	250	649	176
3	500	525	143
3	750	392	106
Ap	250	578	157
Ap	500	508	138
Ap	750	350	95

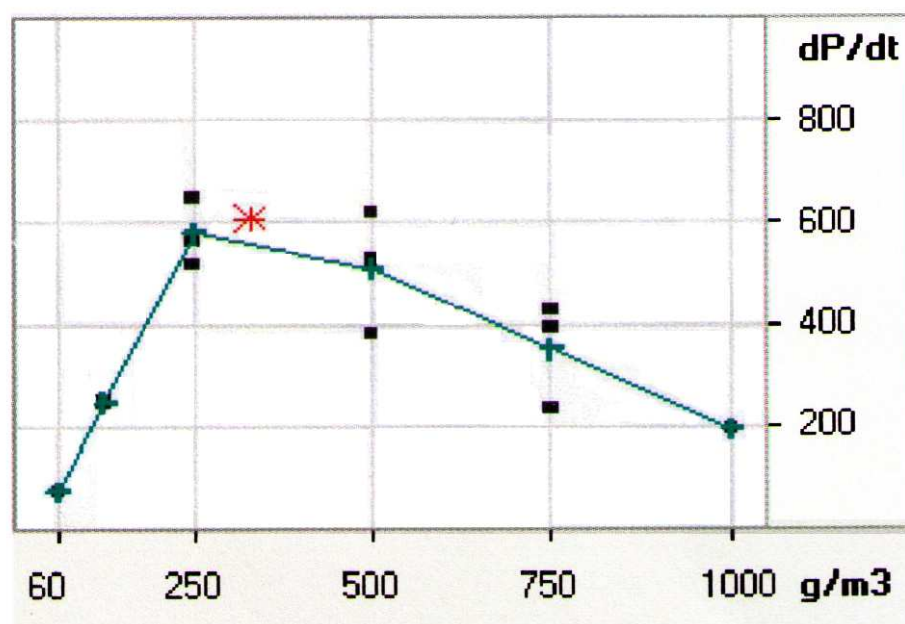
Ap... aritmetický průměr naměřených hodnot

Grafické znázornění maximálních výbuchových parametrů je na následujících grafech. Na obrázku 5-1 je znázorněn maximální výbuchový tlak prachu v závislosti na koncentraci. Z grafu je také patrná hodnota optimální koncentrace, která činí 250 g.m^{-3} .



Obr. 5-1: Závislost maximálního výbuchového tlaku uhlí na koncentraci

Na obrázku 5-2 je znázorněn maximální nárůst výbuchového tlaku v závislosti na koncentraci. Hodnota $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max} = 611 \text{ bar.s}^{-1}$ byla získána interpolací.



Obr. 5-2: Závislost maximálního nárůstu výbuchového tlaku na koncentraci

5.2. Metan

Jako hořlavý plyn, byl pro vytvoření hybridní směsi použit metan. Metan je nejjednodušší uhlovodík, má molekulární vzorec CH_4 . Při pokojové teplotě je to netoxický plyn bez barvy a zápachu, lehčí než vzduch (relativní hustota 0,55 při 20 °C). V přírodě se přirozeně vyskytuje jednak v atmosféře, kde se dostává zejména jako produkt rozkladu látek biogenního původu (bioplyn), nebo jako produkt metabolismu velkých přežvýkavců, ale především v podzemí, jako hlavní složka zemního plynu, rozpuštěný v ropě nebo jako součást důlního plynu. Právě jeho častý výskyt v dolech je častým zdrojem výbuchů a důlních neštěstí. Při těžbě v dolech také snadno dochází při výskytu metanu k tvorbě hybridních směsí s uhelným prachem, což je jedním z důvodů, proč zkoumáme jeho vliv na výbuchové parametry uhelných prachů.

Bod samovznícení je sice velmi vysoký (595 °C, teplota vznícení při koncentraci 8,5 % je 537 °C), ale stačí např. elektrická jiskra nebo otevřený plamen a směs metanu se vzduchem může být přivedena k výbuchu (minimální iniciační energie je 0,28 mJ). Přitom meze výbušnosti jsou značně velké, od 4,4 do 15 objemových procent. Proto je nezbytně nutné průběžně sledovat koncentraci metanu (důlního plynu) v uhelných dolech, aby se předešlo katastrofám.

Důležité charakteristiky:

Minimální iniciační energie:	MIE 0,28 mJ
LEL (při $E_i = 10 \text{ J}$):	$\text{LEL}_{10} = 4,6 \text{ obj. \%}$
UEL (při $E_i = 10 \text{ J}$):	$\text{UEL}_{10} = 14,2 \text{ obj. \%}$
LEL (při $E_i = 10 \text{ kJ}$):	$\text{LEL}_{10000} = 3,6 \text{ obj. \%}$
UEL (při $E_i = 10 \text{ kJ}$):	$\text{UEL}_{10000} = 17,5 \text{ obj. \%}$
Maximální výbuchový tlak:	$P_{\max} = 7,4 \text{ bar}$
Maximální rychlost nárůstu výbuchového tlaku: ($V = 20 \text{ l}$)	$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max} = 203 \text{ bar.s}^{-1}$
Maximální hodnota kubické konstanty:	$K_{\text{st, max}} = 55 \text{ m bar.s}^{-1}$

6. Vliv příměsi hořlavého plynu na výbuchové parametry uhelných prachů

V hlavní části mé práce se zabývám měřením vlivu příměsi malého množství hořlavého plynu na výbuchové parametry uhelných prachů. Jak již bylo uvedeno výše, pro mé měření jsem si zvolil černouhelný prach a jako hořlavý plyn metan. Veškerá měření byla uskutečněna na výbuchovém autoklávu VA – 20 ve spolupráci s VVUÚ a.s. v Ostravě – Radvanicích.

Podle nastudované teorie, by měli výbuchové parametry s přidáváním příměsi hořlavého plynu lineárně růst, takže hlavním cílem mého měření bylo tento předpoklad ověřit, potvrdit či vyvrátit.

Měřili jsme uhelný prach při optimální koncentraci 250 g.m^{-3} , což představovalo navážku 5g prachu pro náš objem výbuchové komory 20 litrů. Nejprve jsme změřili výbuchové parametry čistého prachu a poté postupně přidávali příměs 1 – 6 obj. % metanu. 1 obj. % metanu pro objem 20 litrů představuje 200 ml plynu.

Velikost iniciační energie pro všechna měření byla 10 kJ. Hybridní směsi je doporučeno zkoušet iniciační energií, kterou se zkouší běžně. Vzhledem k tomu, že jsme zkoušeli prach s maximální příměsí 6 obj. % hořlavého plynu, volili jsme 10 kJ, což je standardní iniciační energie pro zkoušení prachů na VK – 20 v České republice.

Měření bylo prováděno třikrát pro každou hodnotu příměsi metanu od 0 - 6 obj. %, abychom co nejvíce minimalizovali nepřesnost měření. Jako výslednou hodnotu bereme aritmetický průměr těchto tří naměřených hodnot.

6.1. Výsledky měření

Veškeré naměřené hodnoty a vypočtené aritmetické průměry jsou uvedeny v tabulce 6-1, Hodnoty $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max}$ a z nich vypočtené hodnoty K_{st} podle rovnice (5) jsou uvedeny v tabulce 6-2.

Tabulka 6-1: Naměřené hodnoty vlivu přídatku metanu na výbuchové parametry černouhelného prachu

Test	množství metanu obj. %	P_{\max} [bar]	$(dp/dt)_{\max}$ [bar.s ⁻¹]
1	0	8	508
2	0	7,3	614
3	0	7,7	594
1	1	9,4	720
2	1	9,2	688
3	1	8,9	759
1	2	9,6	784
2	2	9,9	818
3	2	9,3	796
1	3	9,5	869
2	3	9,6	902
3	3	10	922
1	4	9,7	1124
2	4	9,9	1130
3	4	10,2	998
1	5	10,7	1189
2	5	11,1	1115
3	5	10,6	1246
1	6	11	1422
2	6	11,4	1353
3	6	10,8	1401
Ap	0	7,6	572
Ap	1	9,2	722
Ap	2	9,6	799
Ap	3	9,7	897
Ap	4	10	1084
Ap	5	10,8	1183
Ap	6	11,1	1392

Ap... aritmetický průměr naměřených hodnot

Naměřené hodnoty $(dp/dt)_{\max}$ je nutno pro lepší možnost srovnání přepočíst na hodnoty kubické konstanty K_{st} , která je nezávislá na objemu měřícího zařízení. Hodnoty K_{st} jsou uvedeny v tabulce 6-2. Přepočet je podle rovnice kubického zákona (5).

Tabulka 6-2: Vypočtené hodnoty kubické konstanty K_{st} hybridní směsi

Test	množství metanu obj. %	$(dp/dt)_{\max}$ [bar.s ⁻¹]	K_{st} [bar.m.s ⁻¹]
1	0	508	138
2	0	614	167
3	0	594	161
1	1	720	195
2	1	688	187
3	1	759	206
1	2	784	213
2	2	818	222
3	2	796	216
1	3	869	236
2	3	902	245
3	3	922	250
1	4	1124	305
2	4	1130	307
3	4	998	271
1	5	1189	323
2	5	1115	303
3	5	1246	338
1	6	1422	386
2	6	1353	367
3	6	1401	380
Ap	0	572	155
Ap	1	722	196
Ap	2	799	217
Ap	3	897	243
Ap	4	1084	294
Ap	5	1183	321
Ap	6	1392	378

Ap... aritmetický průměr naměřených hodnot

V tabulce 6-3 je znázorněn nárůst maximálního výbuchového tlaku vlivem příměsi metanu oproti maximálnímu výbuchovému tlaku čisté směsi uhelného prachu se vzduchem bez příměsi hořlavého plynu při optimální koncentraci. Brali jsme pouze hodnoty aritmetického průměru naměřených hodnot.

Tabulka 6-3: Procentuální nárůst hodnot maximálního výbuchového tlaku s příměsí metanu oproti hodnotě maximálního výbuchového tlaku směsi uhelného prachu se vzduchem bez příměsi metanu

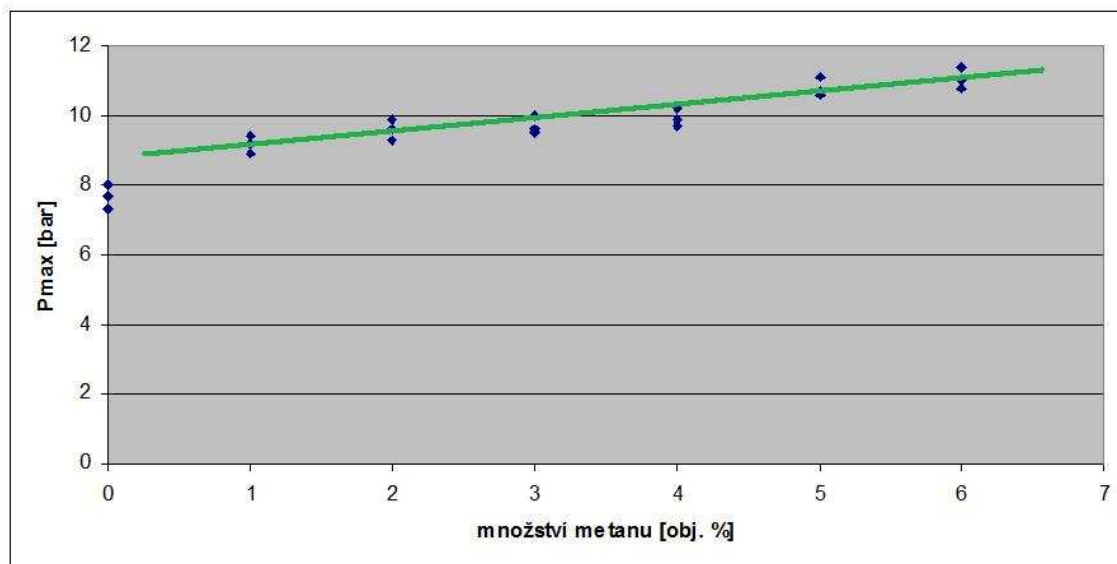
množství metanu obj. %	P_{\max} [bar]	Procentuální nárůst oproti původním hodnotám [%]
0	7,6	-
1	9,2	21%
2	9,6	26%
3	9,7	28%
4	10	32%
5	10,8	42%
6	11,1	46%

V tabulce 6-4 je uveden procentuální nárůst hodnot maximální rychlosti narůstání výbuchového tlaku a hodnot K_{st} oproti hodnotám těchto parametrů směsi uhelného prachu se vzduchem bez příměsi metanu. U hodnot $(\frac{dp}{dt})_{\max}$ a K_{st} bude procentuální nárůst stejný, protože jde o hodnoty získané výpočtem jedné hodnoty na základě druhé.

Tabulka 6-4: Procentuální nárůst maximální rychlosti narůstání výbuchového tlaku a hodnot K_{st} oproti hodnotám těchto parametrů směsi uhelného prachu se vzduchem bez příměsi metanu

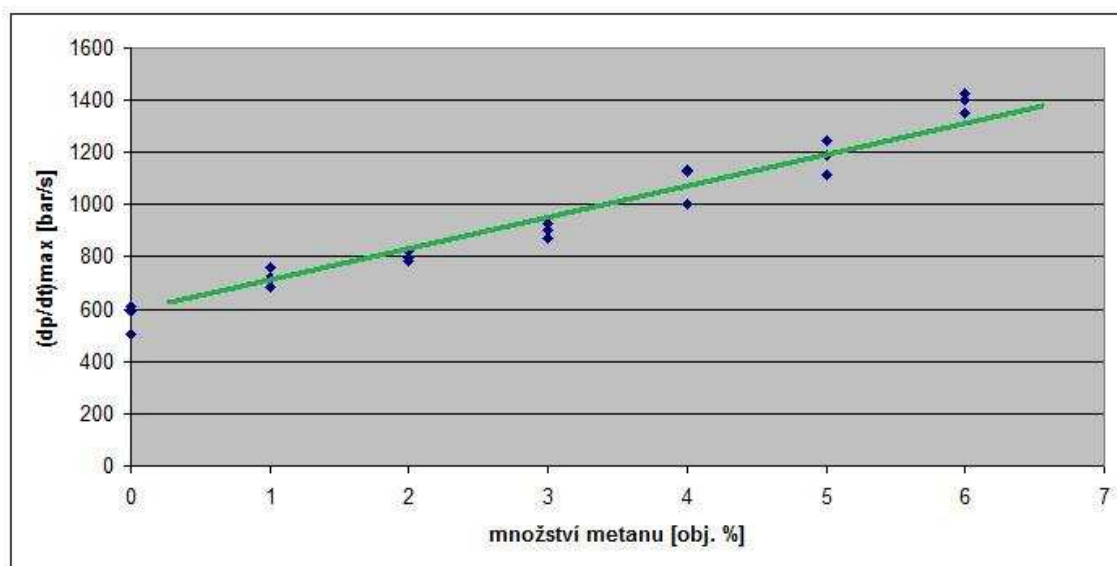
množství metanu obj. %	$(dp/dt)_{\max}$ [bar.s ⁻¹]	K_{st} [bar.m.s ⁻¹]	Procentuální nárůst oproti původním hodnotám [%]
0	572	155	-
1	722	196	26%
2	799	217	40%
3	897	243	56%
4	1084	294	90%
5	1183	321	107%
6	1392	378	143%

Pro lepší přehlednost jsou naměřené hodnoty prezentovány také graficky. Na obrázku 6-1 je znázorněn vliv přídavku metanu na hodnoty maximálního výbuchového tlaku směsi černouhelného prachu se vzduchem.



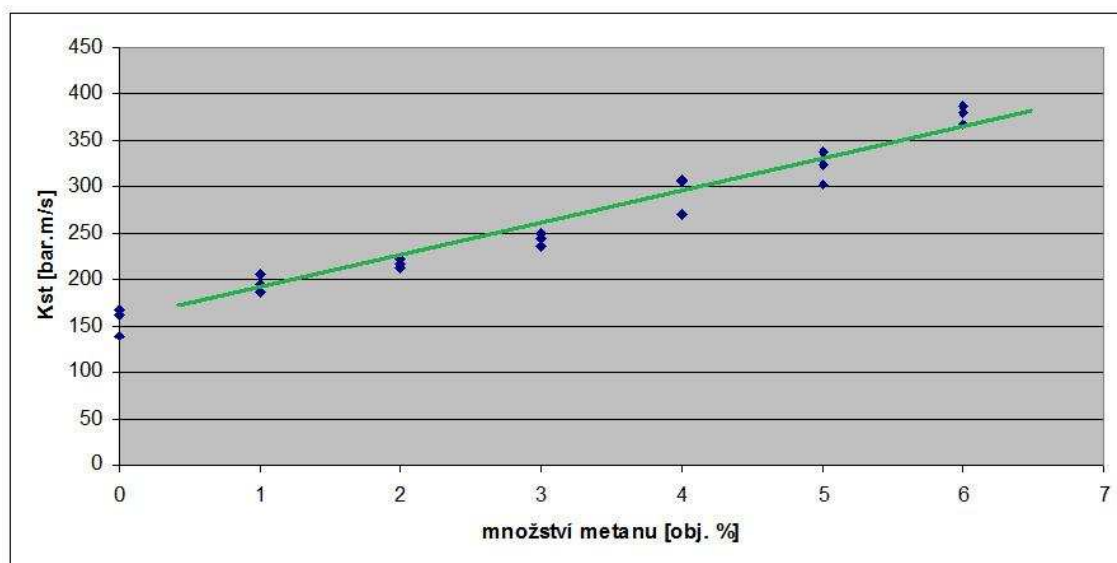
Obr. 6-1: Vliv příměsi metanu na maximální výbuchový tlak směsi černouhelného prachu se vzduchem

Na obrázku 6-2 je znázorněn vliv přídavku metanu na hodnoty maximální rychlosti nárůstu výbuchového tlaku směsi černouhelného prachu se vzduchem.



Obr. 6-2 Vliv příměsi metanu na maximální nárůst výbuchového tlaku směsi černouhelného prachu se vzduchem

Na obrázku 6-3 je znázorněn vliv přídavku metanu na maximální hodnoty kubické konstanty směsi černouhelného prachu se vzduchem.



Obr. 6-3: Vliv příměsi metanu na maximální hodnoty kubické konstanty směsi černouhelného prachu se vzduchem

Jak je patrné z všech grafů výše (obr. 6-1, 6-2, 6-3), naše měření potvrdilo předpoklad, že výbuchové parametry uhelného prachu lineárně rostou s rostoucím přídavkem malého množství hořlavého plynu.

Taky se potvrdil předpoklad, že hodnota maximálního výbuchového tlaku bude ovlivněna méně, než hodnota maximálního nárůstu výbuchového tlaku. Zatímco při přídavku 6 obj. % metanu činil nárůst maximálního výbuchového tlaku 146% maximálního výbuchového tlaku bez příměsi, u rychlosti nárůstu maximálního výbuchového tlaku činil tento nárůst už 243% rychlosti nárůstu maximálního výbuchového tlaku směsi uhelného prachu se vzduchem bez příměsi metanu.

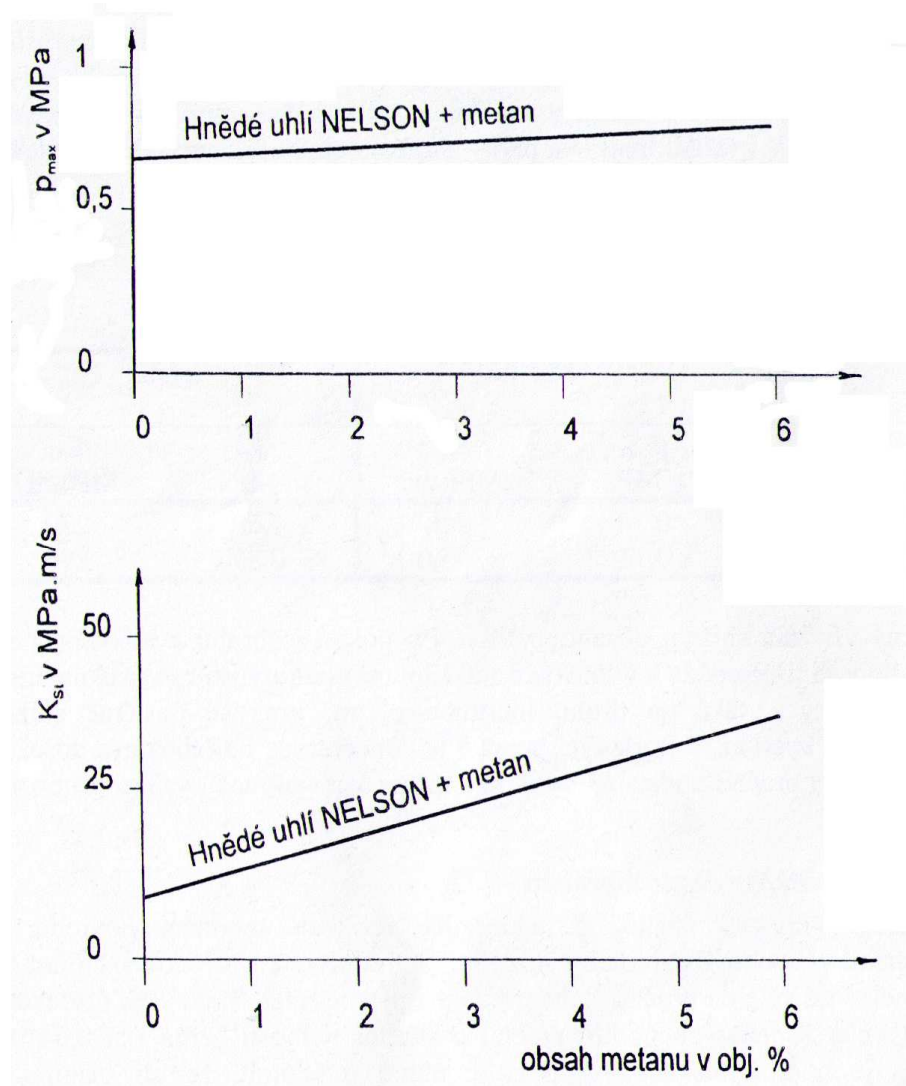
Nejistota měření

Měření bylo pro každou hodnotu procentuální příměsi metanu prováděno třikrát opakovaně za stejných podmínek a ze získaných hodnot byl spočten aritmetický průměr. Pro takový způsob měření by bylo vhodné určit nejistotu měření. Naše měření se ovšem vyznačují velkými rozptyly naměřených hodnot a nejistota měření vychází příliš vysoká. Pro příklad, pro maximální výbuchový tlak uhelného prachu bez přídavku

metanu vyšla rozšířená nejistota 2,3. Takže hodnota aritmetického průměru by měla s připočtenou nejistotou měření být $7,6 \pm 2,3$ bar. Pro $\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max}$ a přídavku 4 obj. % metanu vychází nejistota měření 523, takže hodnota by měla být upravena na 1084 ± 523 bar.s⁻¹. U ostatních naměřených hodnot by nejistota měření vycházela obdobně, proto ji zde ani neuvádím.

6.2. Porovnání výsledků měření s jinými autory

Výbuchové charakteristiky hnědouhelného prachu s příměsí metanu podle [39] jsou znázorněny na obrázku 6-4.



Obr. 6-4: Vliv obsahu metanu na výbuchové parametry hnědého uhlí, zdroj [39]

Jak je vidět na obrázku 6-4 oba výbuchové parametry, jak maximální výbuchový tlak, tak rychlost nárůstu maximálního výbuchového tlaku lineárně rostou, což je v naprostém souladu s našimi výsledky měření.

Znatelný je ovšem rozdíl v nárůstu maximálního tlaku, zatímco u autora [39] roste maximální výbuchový tlak pomaleji (nárůst o cca 15 obj. % pro 6 obj. % metanu oproti původní hodnotě), u našich měření je nárůst poměrně značný (pro 6 obj. % metanu činí nárůst o 46%).

U vlivu příměsi metanu na maximální rychlost nárůstu výbuchového tlaku autor [39] uvádí nárůst asi o 230% při přidavku 6 obj. % metanu. Zatímco u našeho vzorku byl nárůst maximální rychlosti narůstání výbuchového tlaku menší a to o 143 %.

Jedná se ovšem o hnědé uhlí, také nám nejsou známy podrobné informace o měřeném vzorku jako je velikost částic, obsah prchavých složek, vlhkost a podobně.

7. Závěr

Cílem mé práce bylo stanovit vliv příměsi malého množství hořlavého plynu na výbuchové parametry uhelných prachů. V úvodní části jsem rozebral problematiku výbuchových parametrů a také možnosti jejich ovlivnění. Podrobněji se zde zabývám tvorbou hybridních směsí a ovlivněním výbuchových parametrů, především maximálního výbuchového tlaku a maximální rychlosti narůstání výbuchového tlaku prachů přidáním příměsi hořlavého plynu.

V druhé části mé práce prezentuji výsledky laboratorních měření vlivu příměsi malého množství metanu na maximální výbuchové parametry směsi černouhelného prachu se vzduchem. Podrobně zde popisuji měřicí zařízení, výbuchový autokláv VA – 20, zkušební metody a materiální vlastnosti zkoušených vzorků. Hlavním výstupem mé práce jsou naměřené hodnoty vlivu příměsí 1 – 6 objemových procent metanu na maximální výbuchový tlak a maximální rychlost nárůstu výbuchového tlaku směsi černouhelného prachu se vzduchem. Tyto hodnoty jsou přehledně prezentovány ve formě tabulek i graficky.

V mých měřeních se podařilo potvrdit předpoklad z teoretického rozboru problematiky, a to že se maximální výbuchové parametry s rostoucím množstvím hořlavého plynu významně zvyšují. Také jsme ověřili, že tato závislost je lineární, a proto je možné v případě potřeby extrapolací dopočítat další hodnoty. U maximálního výbuchového tlaku činil nárůst při příměsi 1 – 6 obj. % metanu 21 – 46 %. U maximální rychlosti narůstání výbuchového tlaku činil nárůst při příměsi 1 – 6 obj. % metanu 26 – 143 %.

Jedná se o velmi významný nárůst. Proto je nutné tyto informace v praxi zohlednit a to zejména tam, kde je možná tvorba hybridních směsí hořlavého prachu a hořlavého plynu, ať už se jedná o důlní činnost, potravinářství, farmacii nebo jiné.

8. Literatura

- [1] DAMEC, J. *Protivýbuchová prevence*. 1. vydání. SPBI. Ostrava. c1998. 188 s. ISBN 80-86111-21-0
- [2] BUSSENIUS, Siegfried. *Protipožární a protivýbuchová ochrana průmyslu*. Přel. Jaroslav Damec. 1. vyd. Praha. Svaz požární ochrany ČSSR, 1985. 462s.
- [3] VRÁNA, V.; KOLÁŘ, V. *Rozvody elektrické energie v prostorách s nebezpečím výbuchu*. Ostrava. Vysoká škola báňská, Březen 2009.
- [4] Česko. Vláda. Nařízení vlády č. 406/2004 Sb. ze dne 2. června 2004 o bližších požadavcích na zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví při práci v prostředí s nebezpečím výbuchu. Uveřejněno v: č. 131/2004 *Sbírka zákonů, Česká Republika*. 2004. str. 7891
- [5] MAKOVÍČKA, D.; JANOVSKEÝ, B.; a kol. *Příručka protivýbuchové ochrany staveb*. Česká technika – nakladatelství ČVUT. Praha, 2008, ISBN 978-80-01-04090-4
- [6] MANNAN, S. [editor]. *Lee's [i.e. Lees'] loss prevention in the process industries: hazard identification, assessment and control. Volume 1*. 3 ed. USA, Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann. c2005. ISBN 0-7506-7857-7
- [7] MANNAN, S. [editor]. *Lee's [i.e. Lees'] loss prevention in the process industries: hazard identification, assessment and control. Volume 2*. 3 ed. USA, Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann. c2005. ISBN 0-7506-7858-5
- [8] MARSHALL, V.; RUHEMANN, S. *Fundamentals of process safety*. Publ. Institut of Chemical Engineers (IChemE), Rugby UK. c2001. s 298. ISBN 978-0-85295-431-7
- [9] NFPA 69: Standard on Explosion Prevention Systems, 2008 Edition. USA. National fire protection association
- [10] JANÍČEK, M. *Pyrotechnická ochrana před terorismem*. Vyškov. c2002. 158 s. ISBN 80-902089-6-7
- [11] BARTLOVÁ, I. *Nebezpečné látky I*. 2. vydání. SPBI. Ostrava. c2005. s. 211. ISBN 86-86634-59-0

- [12] BARTLOVÁ, I.; DAMEC, J. *Prevence technologických zařízení*. SPBI. Ostrava. c2002. s 243. ISBN 80-86634-10-8
- [13] KRAUS, V. *Povrchy a jejich úpravy*. ZCU. Plzeň. c2000
- [14] ECKHOFF, R. K. *Dust explosion in the process industries*. 3. vydání. Gulf Professional Publishing. Amsterdam. c2003. s. 719. ISBN 0-7506-7602-7
- [15] BARTON, J. *Dust explosion prevention and protection*. Gulf Professional Publishing. Woburn. c2002. s. 352. ISBN 0-7506-7519-5
- [16] DAMEC, Jaroslav. *Protivýbuchová prevence*. 1. vyd. SPBI. Ostrava. Vysoká škola báňská, 1993. 123 s. ISBN 80-7078-190-4
- [17] KONDERLA, I. *Návrh metodiky měření teplotních mezí výbušnosti*. Diplomová práce. Ostrava. Vysoká škola báňská. 2008. 62 s.
- [18] MOKOŠ, L. Základní požárně technické charakteristiky a jejich význam v technické praxi. Výzkumný ústav bezpečnosti práce. *Knihovna BOZP, čítárna* [online].c2007. [cit. 15. 4. 2010]. Dostupný z WWW: http://www.bozpinfo.cz/knihovnabozp/citarna/tema_tydne/ptch07.html
- [19] KOŘÍNEK, K. Požárně technické charakteristiky prachů a jejich význam v technické praxi. *CHEMagazín* [online]. Pardubice: CHEMagazín, 2006 [cit. 15. 4. 2010]. Dostupný z WWW: http://www.chemagazin.cz/Texty/CHXVI_6_cl1.pdf
- [20] ČSN EN 14034-1 (389604). *Stanovení výbuchových charakteristik rozvířeného prachu - Část 1: Stanovení maximálního výbuchového tlaku p_{\max} rozvířeného prachu*. Praha: Český normalizační institut. c2005. 24 s.
- [21] ČSN ISO 6184-4 (389600). *Systémy ochrany proti výbuchu. Část 4: Určování účinnosti systémů na potlačování výbuchu*. Praha: Český normalizační institut. c1993. 8 s.
- [22] KVARČÁK, M. *Základy požární ochrany*. 1. vydání. SPBI. Ostrava. c2005. 134 s. ISBN 80-86634-65-5
- [23] DAMEC, J.; ŠIMANDL, L. *Laboratorní praktikum protivýbuchové prevence technologických procesů*. 1. vydání. Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství. Ostrava. c2005. 35 s. ISBN 80-86634-57-4
- [24] MAKOVÍČKA, D. [editor] et al. *Odezva stavebních konstrukcí při zatížení výbuchem a jejich ochrana*. [sborník přednášek: vzdělávací seminář - pilotní kurs projektu Protivýbuchová ochrana staveb: Praha, 13. 2. 2008]. České vysoké učení technické. Praha. c2008. ISBN 978-80-01-03991-5

- [25] JANOVSKEÝ, B. [editor]; MAKOVÍČKA, D.; et al. *Parametry tlakových vln, zatížení konstrukcí a jejich ochrana*. [sborník přednášek: vzdělávací seminář - pilotní kurs projektu Protivýbuchová ochrana staveb: Praha, 20. 6. 2007]. České vysoké učení technické. Praha. c2007. ISBN 978-80-01-03685-3
- [26] MAKOVÍČKA, D. [editor]. *Hodnocení bezpečnosti a spolehlivosti konstrukcí*. [vzdělávací seminář - pilotní kurs projektu Protivýbuchová ochrana staveb: Praha, 25. 6. 2008: sborník přednášek] České vysoké učení technické. Praha. c2008. ISBN 978-80-01-04089-8
- [27] JANOVSKEÝ, B. [editor]; MAKOVÍČKA, D.; et al. *Vlastnosti výbušin a analýza charakteru výbuchového zatížení a jeho modifikací*. [sborník přednášek: vzdělávací seminář - pilotní kurs projektu Protivýbuchová ochrana staveb: Praha, 14. 2. 2006]. České vysoké učení technické. Praha. c2007. ISBN 978-80-01-03640-2
- [28] HROCH, L.; ŠTEMBERKA, M. Protizáparová prevence v rozhodnutí S 300/2008. *Záchranář* [online]. 1-6-2009. č. 2/2009. [cit. 20-4-2010]. Dostupný z WWW: <<http://www.zachranar.cz/zakaznici/hbzs/redsystnsf/web-all/68D5370CC24EBE15C12575EF003A0B1E>>
- [29] KALEJAIYE, O.; AMYOTTE, P. R.; PEGG, M. J.; CASHDOLLAR, K. L. *Effectiveness of Dust Dispersion in the 20-L Siwek Chamber*. [Sborník: Sixth International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions (Halifax, NS, Canada, 27. srpna – 1. září 2006), Halifax, Canada: Dalhousie University, Srpen 2006; 1:253-278] The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH).
- [30] HONG-CHUN, Wu; HSIN-JUNG, Ou; HSIAO-CHI, Hsiao; TUNG-SHENG, Shih. *Explosion Characteristics of Aluminum Nanopowders*. Taiwan. C2010. Taiwan Association for Aerosol Research ISSN: 1680-8584
- [31] CESANA, Ch.; SIWEK, R. *20-l-Apparatus Manual*. Kühner AG, Dinkelbergstrasse 1, CH-4127 Birsfelden, Switzerland. 56 s.
- [32] HATTWIG, M.; STEEN, H. *Handbook of explosion prevention and protection*. Germany. c2004 Willey-VCH GnbH & Co. KGaA. Weinheim. 671 s. ISBN 3-527-30718-4
- [33] MICHAL, P.; *Bioplyn – energie ze zemědělství*. Praha. c2005. Dostupný z WWW: <http://www.agronavigator.cz/attachments/Studie_bioplyn.pdf>

- [34] KENT, J. A. [editor]; RIEGEL R. *Riegel's handbook of industrial chemistry*. 10. vydání, c2003. Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York. ISBN 0-306-47411-5
- [35] KALOUSEK, J. *Základy fyzikální chemie hoření, výbuchu a hašení*. Sdružení bezpečnostního a požárního inženýrství. c1999. Ostrava. ISBN 80-86111-34-2
- [36] JUN, Deng; FANGMING, Cheng.; ZHENMIN, Luo.; HUA, Wang. Experimental Study on Explosion Property of Methane in Turbulent Flow. *Sciencepaper Online* [online časopis] China. c2008. University of Science and Technology; 2. China University of Mining and Technology. Dostupný z WWW:<http://www.paper.edu.cn/en/paper.php?serial_number=200804-32>
- [37] BECK, G.; BAGANZ, K.; KUNATH, J. *Samsung sicherheitstechnischer Kennzahlen brennbarer Srube aus der Land- und Nahrungsgüterwirtschaft*. Schlieben/Bornim, Deutschland. c1984. Akademie der Landwirtschaftswissenschaften. ISSN 0233-0652
- [38] FONIOK, Rudolf et. al. *Katalog vznětlivých vlastností uhelného prachu*. c1985. Vědeckovýzkumný uhelný ústav Ostrava – Radvanice.
- [39] DAMEC, J.; FONIOK, R. *Zünd – und Explosionseigenschaften hybrider Gemische*. Berlin. c1984. Brandschutz Explosionschutz aus Forschung und Praxis.

9. Přílohy

9.1. Seznam obrázků

Obr. 2-1: Tři základní „stavební kameny“ pro vznik výbuchu	7
Obr. 2-2: Průběhy tlaků ve volném prostoru, zdroj [5] a) spojitá vlna b) rázová vlna	8
Obr. 2-3: Výbuchová křivka, podle [1]	9
Obr. 2-4: Vliv koncentrace na tvar výbuchové křivky, [16]	10
Obr. 2-5: výbuchová charakteristika směsi hořlavého prachu se vzduchem, zdroj [12]	11
Obr. 2-6: Vliv objemu při výbuchu směsi propanu se vzduchem, zdroj [16]	14
Obr. 2-7: Objemová závislost prudkosti výbuchu vybraných hořlavých plynů, zdroj [16]	15
Obr. 2-8: Objemová závislost prudkosti výbuchu vybraných hořlavých prachů, zdroj [16]	16
Obr. 2-9: Vliv tvaru nádoby na výbuchové parametry metanu při různých počátečních tlacích, [16]	17
Obr. 2-10: Vliv počátečního tlaku na výbuchové parametry směsi metanu se vzduchem, zdroj [1]	18
Obr. 2-11: Vliv počátečního tlaku na maximální výbuchové parametry směsi prachu škrobu se vzduchem, zdroj [1]	19
Obr. 2-12: Vliv velikosti iniciační energie na prudkost výbuchu propanu, zdroj [16] ..	20
Obr. 2-13: Vliv místa iniciace na rychlost narůstání výbuchového tlaku směsi metanu se vzduchem, [16]	20
Obr. 2-14: Vliv turbulence na výbuchové parametry metanu, zdroj [1]	21
Obr. 2-15: Vliv velikosti zrna na výbuchové parametry hořlavých prachů (E_i 10KJ), zdroj [16]	22
Obr. 2-16: Vliv jemného podílu prachu u velikosti zrn na výbuchové parametry, zdroj [16]	23
Obr. 2-17: Vliv obsahu vody v hnědouhelném prachu na jeho meze (a) a maximální výbuchové parametry (b), zdroj [16]	25

Obr. 3-1: Výbuchové parametry směsi PVC/metan/vzduch (nádobu 1m ³ , E _i = 10kJ), zdroj [16].....	26
Obr. 3-2: Výbuchové parametry směsi PVC/metan/vzduch, zdroj [16].....	27
Obr. 3-3: Vliv příměsi metanu na LEL prachu PVC (d _{stř} = 14 μm), zdroj [16]	28
Obr. 3-4: Závislost spodní meze výbušnosti LEL uhelného prachu a minimální iniciační energie uhelného prachu na koncentraci metanu, zdroj [28]	29
Obr. 4-1: Schéma měřicí soustavy	31
Obr. 4-2: Výbuchový autokláv VA - 20	32
Obr. 4-3: Navážka.....	33
Obr. 4-4: Dávkování metanu.....	34
Obr. 4-5: Chemický palník, iniciační zdroj (10 kJ)	34
Obr. 5-1: Závislost maximálního výbuchového tlaku uhlí na koncentraci.....	40
Obr. 5-2: Závislost maximálního nárůstu výbuchového tlaku na koncentraci	40
Obr. 6-1: Vliv příměsi metanu na maximální výbuchový tlak směsi černouhelného prachu se vzduchem.....	46
Obr. 6-2 Vliv příměsi metanu na maximální nárůst výbuchového tlaku směsi černouhelného prachu se vzduchem	46
Obr. 6-3: Vliv příměsi metanu na maximální hodnoty kubické konstanty směsi černouhelného prachu se vzduchem	47
Obr. 6-4: Vliv obsahu metanu na výbuchové parametry hnědého uhlí, zdroj [39]	48

9.2. Seznam tabulek

Tabulka 2-1: Rozdělení hořlavých prachů do tříd podle K _{st}	16
Tabulka 2-2: Výbuchové parametry metanu a vodíku ve směsi se vzduchem a kyslíkem, zdroj [12].....	24
Tabulka 5-1: Sítový rozbor vzorku černouhelného prachu.....	37
Tabulka 5-2: Výbuchové parametry černouhelného prachu	38
Tabulka 5-3: Hodnoty K _{st} černouhelného prachu	39
Tabulka 6-1: Naměřené hodnoty vlivu přídatku metanu na výbuchové parametry černouhelného prachu	43
Tabulka 6-2: Vypočtené hodnoty kubické konstanty K _{st} hybridní směsi	44

Tabulka 6-3: Procentuální nárůst hodnot maximálního výbuchového tlaku s příměsí metanu oproti hodnotě maximálního výbuchového tlaku směsi uhelného prachu se vzduchem bez příměsí metanu..... 45

Tabulka 6-4: Procentuální nárůst maximální rychlosti narůstání výbuchového tlaku a hodnot K_{st} oproti hodnotám těchto parametrů směsi uhelného prachu se vzduchem bez příměsí metanu 45

9.3. *Seznam zkratek*

LEL: spodní mez výbušnosti

UEL: horní mez výbušnosti

LEP:spodní teplotní mez výbušnosti

UEP:horní teplotní mez výbušnosti

MIE: minimální iniciační energie

PTCH: požárně-technická charakteristika

LOC: limitní (mezní) koncentrace kyslíku

NFPA: Národní asociace požární ochrany, USA (National fire protection association)

U.S.A.: Spojené státy americké (United States of America)

ČSN: Česká technická norma (dříve Československá státní norma a Československá norma)

EN: Evropská norma

PVC: polyvinylchlorid

ISBN: Systém mezinárodního standardního číslování knih (International Standard Book Numbering)

ISSN: Systém mezinárodního standardního číslování seriálových publikací (International Standard Serial Number)